

# ***Introduzione***

«No visual pattern is only itself.»

**Arnheim, 1954, p. 63.**

Per affrontare un problema è sempre necessario definire gli ambiti in cui questo si verifica, nonché le condizioni che lo determinano. Anche nel nostro caso, quindi, prima di affrontare la percezione visiva, sarà necessario fare un passo indietro per analizzare lo stimolo distale *di per se* e solo in seguito determinare quali degli aspetti fisici contenga informazioni salienti per il sistema percettivo. Ciò permetterà una trattazione più agevole delle parti che seguiranno nel discorso.

La ricerca nell'ambito della visione mette in evidenza la discrepanza tra il mondo fisico e quello percettivo. Tuttavia, esiste un collegamento tra i due piani, perché la percezione si basa su alcuni aspetti del mondo fisico. Di conseguenza lo stimolo distale è composto anche da parti che apportano informazione significativa per la percezione del mondo. Non si può trattare la percezione senza mai riferirsi, quindi, alla realtà fisica.

## ***Luce***

È difficile spiegare cosa sia la luce senza considerare la *fisica ottica*. Una sorgente luminosa emette radiazioni elettromagnetiche (cioè energia che si propaga in linea retta, per raggi) che sono caratterizzabili o come particelle, dette fotoni, o come onde. A seconda dei casi, l'interazione luce-materia è descritta utilizzando il modello corpuscolare o il modello ondulatorio.

I fotoni interagiscono con gli atomi che compongono gli oggetti del mondo macroscopico. Considerare il comportamento di ogni singolo fotone potrebbe essere formalmente elegante, ma inutile nella pratica. Ad esempio, ciò risulta irrilevante per la geometria e la cinematica del flusso ottico, dove è sufficiente parlare di raggi, continui e rettilinei.

La stimolazione che riceve un percipiente (sia esso biologico o artificiale) è determinata da un numero elevatissimo di fattori. Per questo motivo si è cercato di riassumere e semplificare l'interazione luce-oggetto con una serie di regole tratte dalla cosiddetta *ottica dei raggi macroscopica*. Quindi, pur trascurando il livello microscopico, è possibile determinare il comportamento dei fotoni considerati come un insieme.

## ***Pattern organizzato***

Dopo queste premesse siamo pronti ad affrontare il problema dello stimolo prossimale inteso come *array* ottico, ossia l'insieme organizzato delle proiezioni luminose che dallo stimolo distale raggiungono un dato punto di vista. L'assetto ottico è determinato dalla forma geometrica tridimensionale e dalle caratteristiche fotometriche della scena. La luce riflessa da un oggetto, infatti, dipende dalla sua forma e dal tipo di materiale di cui è composto. Anche se le due caratteristiche interagiscono nella formazione delle immagini (retiniche, fotografiche...), è possibile separarle concettualmente per poterne determinare l'influenza nella percezione. La percezione del mondo fisico, infatti, è influenzata da infiniti fattori e soltanto la scomposizione del problema permette di semplificare l'analisi conoscitiva.

### ***Descrizione geometrica***

L'organizzazione tridimensionale è il fattore che determina i volumi in cui sono confinati gli oggetti e la loro forma tridimensionale. Esistono diversi modi per definire matematicamente la forma di un oggetto. Di seguito verranno presi in esame solamente alcuni di questi, scelti tra la miriade di quelli possibili per la frequenza con cui vengono utilizzati nella letteratura del settore.

Una forma geometrica (completamente connessa) in uno spazio tridimensionale può essere descritta analiticamente definendo tutti i punti che ne sono inclusi oppure, più semplicemente, determinandone il contorno includente. In genere si preferisce utilizzare la seconda possibilità, sfruttando il fatto che questa descrizione può essere formalmente espressa mediante una funzione matematica che delinea una superficie.

Mingolla e Todd (1984) propongono un modo per descrivere una superficie quadratica nello spazio cartesiano utilizzando la seguente equazione:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0$$

dove  $a_{11}$ ,  $a_{22}$  e  $a_{33}$  determinano il tipo e la forma della superficie (ad esempio per una sfera  $a_{11}=a_{22}=a_{33}>0$ ),  $a_{12}$ ,  $a_{13}$  e  $a_{23}$  le quantità di rotazione rispetto ai tre assi cartesiani,  $a_{14}$ ,  $a_{24}$  e  $a_{34}$  le traslazioni e  $a_{44}$  il fattore di scala. Questo tipo di descrizione, tuttavia, è utile solo nel caso in cui si voglia utilizzare una proiezione ottica inversa a partire dal piano immagine; ovvero, se per ogni elemento dello schermo si vuole determinare l'intensità della riflessione dell'oggetto nel punto proiettivamente determinato.

Un metodo più agevole suppone che ogni superficie possa essere descritta come un insieme di *patch*. Un *patch*, o *surface-element*, è un qualsiasi parte continua della superficie fisica dell'oggetto con area non nulla, ma tendente a 0 (Burigana, 1999), come illustrato nella Figura 1. Grazie al motore di *rendering* esposto al Paragrafo 3.1.

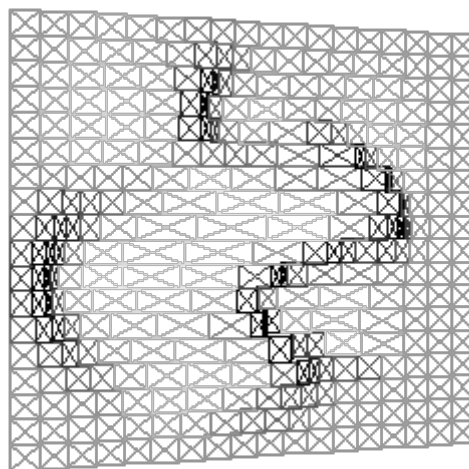


Figura 1: Superficie suddivisa in *patch* triangolari.

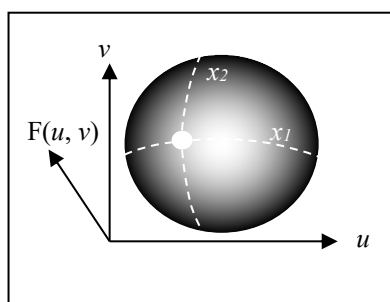
In tal modo la forma globale è definita matematicamente dall'equazione di Taylor:

$$f(x, y) = A_1 + (B_1x + B_2y) + \frac{1}{2}(C_1x^2 + C_2xy + C_3y^2) + \text{ordini superiori}$$

Con *patch* piccoli si possono eliminare i termini di ordine superiore giungendo ad una descrizione quadratica del tipo

$$F(u, v) = \frac{1}{2}(x_1u^2 + x_2v^2)$$

dove  $x_1, x_2$  sono le *curvature principali* (che rappresentano la quantità di curvatura nella direzione degli assi ortogonali) ed  $u, v$  sono le direzioni principali (perpendicolari tra loro) come evidenziato nella seguente Figura 2.



**Figura 2: CURVATURE PRINCIPALI  $x_1$  E  $x_2$ .**

Quest'equazione permette di classificare la forma locale di ogni punto in tre categorie. I punti ellittici hanno le curvature principali  $x_1$  e  $x_2$  dello stesso segno, i punti iperbolici le hanno di segno contrario e quelli parabolici ne hanno almeno una nulla (Mingolla e Todd, 1986).

Le rappresentazioni di cui ho parlato sopra permettono di definire la forma tridimensionale di una superficie, tuttavia, non consentono di determinare il pattern proiettato in un punto di vista. Immaginando di interporre un piano (detto *piano-immagine*) fra l'oggetto e il punto di vista, le proiezioni dell'oggetto tridimensionale su di esso determinano il corrispettivo dell'assetto ottico detto appunto *rappresentazione pittorica*. Naturalmente, tale proiezione non preserva tutte le proprietà geometriche della terza dimensione. Inoltre, il rapporto tra superficie 3D e la sua proiezione in un punto di vista non è biunivoco: dato un oggetto tridimensionale è sempre possibile determinarne il corrispettivo pittorico, mentre data una rappresentazione bidimensionale di un oggetto solido, non necessariamente è possibile ottenere il suo corrispettivo 3D. La forma

tridimensionale determina anche degli angoli solidi sottesi nella proiezione in un punto di vista. Conseguenza proiettiva del *layout* spaziale è che un oggetto proiettato in uno spazio pittorico bidimensionale ha un'area delimitata da una linea chiusa. Questa linea può essere determinata dai bordi dell'oggetto stesso o da contorni occludenti.

La “*depth-map*” è uno dei modi più agevoli per definire la forma di una superficie tridimensionale rispetto ad un punto di vista. Essa pone in relazione la profondità di ogni punto con la proiezione che avrebbe sul piano-immagine. È una specificazione per ogni punto del piano-immagine della distanza delle superfici mediante la formula  $z = f(x, y)$ <sup>1</sup>.

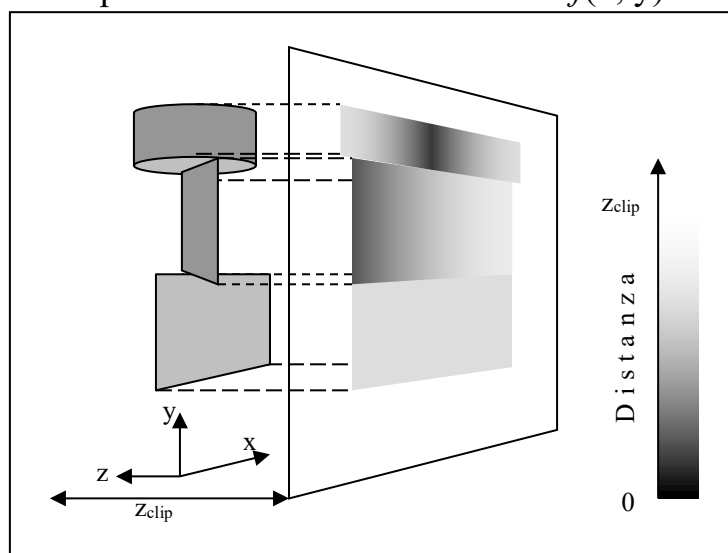


Figura 3: *DEPTH-MAP*.

Un altro tipo di rappresentazione della forma di una superficie può essere fatta descrivendo equivalenti porzioni di superfici rivolte verso il punto di vista. Koenderink (1990), ad esempio, per descrivere la superficie propone di usare due indici, i cui valori risultano invarianti alle trasformazioni.

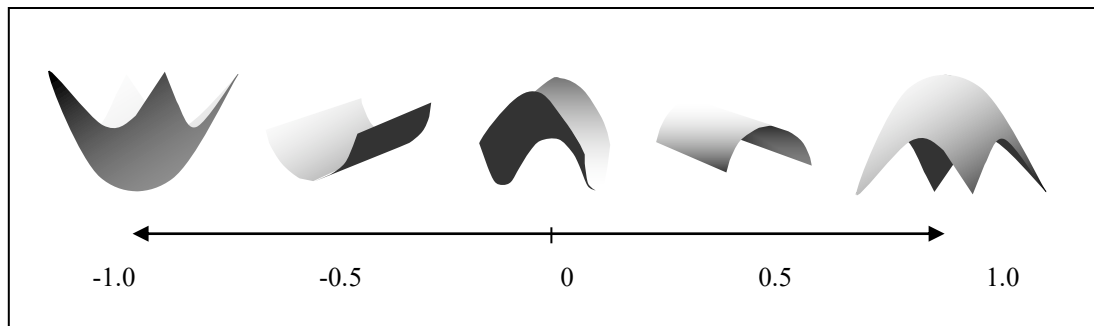
- S o “*Shape-index*” che risulta essere indipendente dalla scala, in quanto identifica la forma in un range  $-1 \div +1$  secondo il rapporto tra le due curvature principali. La Figura 4, che evidenzia la variazione di questo parametro, è la generalizzazione in 3D della differenza tra concavo, retto, convesso in un immagine bidimensionale.

<sup>1</sup> In questo caso, i punti della superficie hanno coordinate tridimensionali  $(x, y, f(x, y))$ .

$$S = -\frac{2}{\pi} \arctan \frac{x_1 + x_2}{x_1 - x_2}; (x_1 \geq x_2)$$

- C o “*Curvedness*”, che descrive la quantità di curvatura:

$$C = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2}{2}}$$



**Figura 4: FORMA CORRISPONDENTE AI VALORI CRITICI DELLO *SHAPE-INDEX* S. Le forme rappresentate corrispondono a una proiezione su un piano immagine uscente dal foglio e sopra di esse. Riadattata da Koenderink, 1990.**

### **Descrizione fotometrica**

Le proprietà fotometriche degli oggetti sono quegli aspetti della scena che determinano le modalità di riflessione della luce nei vari punti. In un mondo immaginario in cui gli oggetti non riflettessero la luce, gli occhi non servirebbero a molto.

Gli effetti delle variabili fotometriche nello stimolo prossimale sono notevoli. Due oggetti con la stessa forma geometrica, ma con proprietà di riflessione diverse, infatti, possono determinare un pattern completamente diverso su un piano-immagine.

Per semplificare il problema della complessità fotometrica, usualmente si procede in due modi: eliminando delle possibilità di variazione dello stimolo semplificando le condizioni, oppure suddividendo il tutto in sottoproblemi affrontandoli uno per volta. Nel nostro caso, ad esempio, si assume che le superfici abbiano uno spettro di riflettanza parallelo (ciò che viene espresso col termine “*gray-world*”), che la luce sia bianca, che la riflettanza sia costante in tutti i punti (come il “*world of one reflectance*” di Gilchrist e Jacobsen, 1984) e che il comportamento di

riflessione possa essere suddiviso secondo l'effetto che determina nello spazio pittorico.

In un'immagine bidimensionale di un oggetto si possono riscontrare diverse aree, ognuna delle quali viene identificata secondo la particolare condizione di illuminazione cui è sottoposta e del *comportamento fotometrico prevalente* (Figura 4). Queste aree, nella loro totalità, vengono generalmente definite *chiaroscuro* (Hogarth, 1984) non sono diverse a livello fisico.

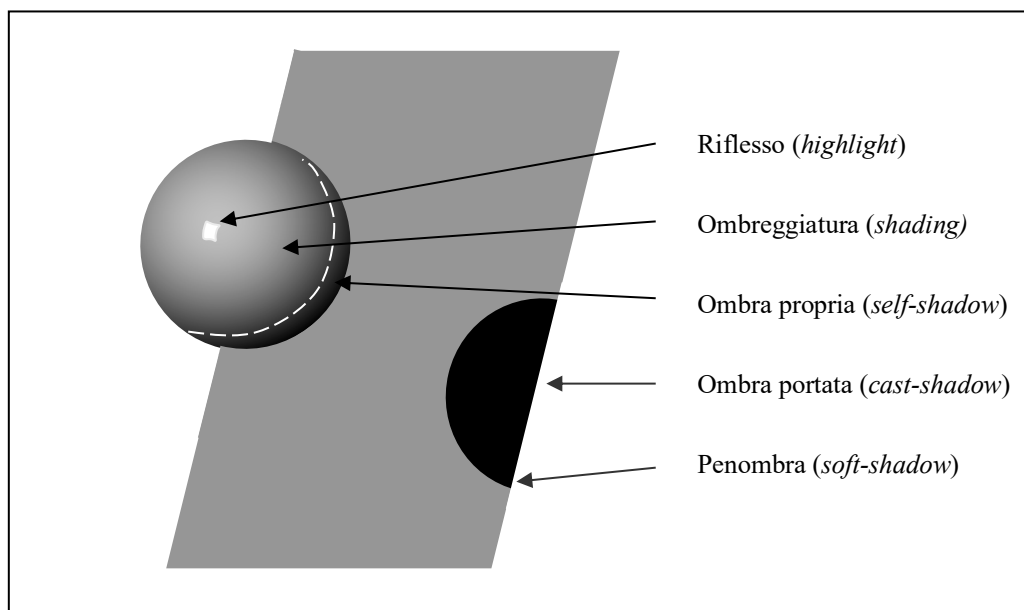


Figura 5: Aree di un'immagine suddivise secondo il pattern locale.

Sia nel mondo artistico che in quello della Computer Graphics la distinzione della Figura 5 risulta di una certa utilità, in quanto lo scopo ultimo in questi campi è proprio la riproduzione efficace (anche se non sempre fisicamente plausibile) degli oggetti, della loro forma ed organizzazione spaziale. Mediante tale distinzione sono qui elencati alcuni nomi correntemente utilizzati di cui si darà una definizione generica. Per gli altri aspetti di ognuno si rimanda ai paragrafi specifici.

- Lo *shading* è «la variazione del flusso luminoso riflesso dalla superficie in funzione dell'angolo tra normale [alla superficie] e direzione della luce» (Pentland, 1982), delle proprietà di riflessione dell'oggetto e delle caratteristiche dell'illuminante. Esso è il risultato dell'interazione della luce con gli oggetti solidi,

cioè del modo in cui la luce viene modulata attraverso la riflessione ottica (Burigana, 1999). Nella letteratura del settore si può trovare riferimento all'argomento con i termini italiani *ombreggiatura* o *chiaroscuro*, presi a prestito dal linguaggio utilizzato nella pittura del Rinascimento. Lo *shading* dipende essenzialmente dall'orientamento relativo tra la direzione di illuminazione e la superficie sottoposta ad illuminazione diretta.

- I *riflessi* (Beck, 1972) o *highlight* sono le zone delle superfici lucide in cui è presente una certa quota della riflessione speculare della luce. *Shading* e *highlight* sono in qualche modo imparentati. Lo *shading* radicale o “puro” si ha con superfici lambertiane perfette. L'*highlight* radicale si ha con superfici speculari perfette. Nei mondi non perfetti (come il nostri) le due cose spesso si combinano. Per questo la Figura 1 è, per così dire, eterogenea: rappresenta effetti con origini diverse

Le *zone in ombra*, diversamente dalle aree con *shading* non ricevono illuminazione diretta. Forma e posizione spaziale dell'ombra dipendono dall'organizzazione tridimensionale della scena. Possono essere suddivise in proprie e portate (ma esistono molti altri nomi) se ricadono sullo stesso oggetto oppure su un altro.

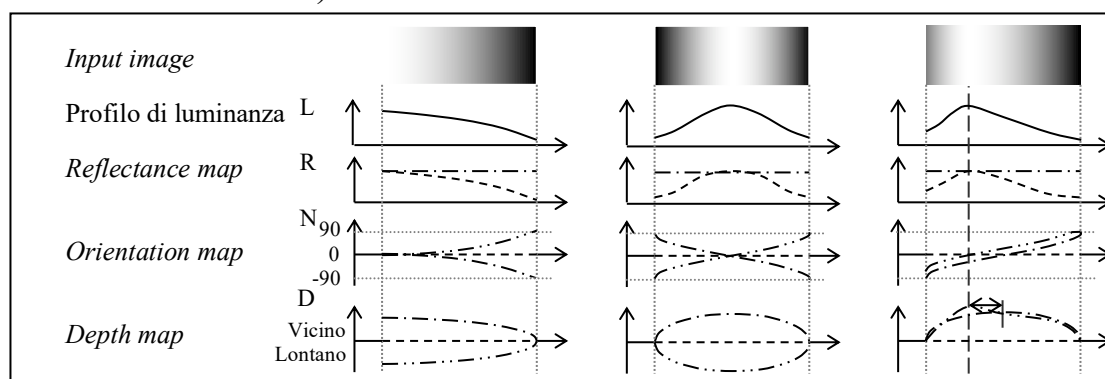
- *Cast-shadow*, ombre *portate*, *proiettate* o *estrinseche*, sono quelle che si registrano quando l'ombra di un oggetto viene proiettata su un'altra superficie.
  - *Self-shadow*, ombre *proprie* o *intrinseche*, sono presenti nelle zone dell'oggetto che non sono orientate verso l'illuminante e quindi non escono dal contorno dell'oggetto.
- Le aree chiamate *penombra* sono presenti quando l'illuminazione non proviene da una sorgente puntiforme. Ricevono una quantità di luce maggiore delle aree in ombra, ma non tutta quella che arriverebbe se non ci fosse un oggetto opaco frapposto.



## Interpretazione dello stimolo

Come abbiamo visto finora, una determinata situazione fisica risponde a delle leggi costanti. Secondo Marr (1982) il sistema percettivo è in grado di sfruttare questi *vincoli* per semplificare il problema della percezione, ossia determinare quale sia la situazione che ha prodotto uno stimolo prossimale. Arnheim (1954), tuttavia, sostiene che “l’occhio non può distinguere direttamente le proprietà di riflessione dalla quantità di illuminazione”, apportando come esempio che “Nelle sculture, macchie scure del marmo [...] spesso distorcono la forma [percepita] essendo confuse per effetti dello *shading*”(pp. 255-256). Secondo Barrow e Tenenbaum (1978) il problema della percezione in generale, e il problema particolare sollevato da Arnheim, può essere formulato anche come la computazione di *immagini intrinseche* che rappresentano le proprietà fisiche di una scena. Per interpretare correttamente una scena è necessario derivare:

- la “mappa di riflettanza”, ossia la specificazione per ogni area delle superfici della scena delle caratteristiche fotometriche di riflessione;
- la rappresentazione della profondità e dell’orientamento delle superfici che hanno un diretto corrispettivo nell’immagine retinica (che Marr e Nishihara, 1978 e Marr, 1982, chiamano  $2\frac{1}{2}D$  sketch).



**Figura 6: ESEMPI DI RAPPRESENTAZIONI INTRINSECHE.** Le linee ---- indicano un’interpretazione di un oggetto piano, le linee - - - e - - - - interpretazioni che darebbero origine a un percepito di forma tridimensionale.

Adelson e Pentland (1996) definiscono le due rappresentazioni come “*reflectance image*” e “*shading image*”<sup>2</sup>. La *shading image* può essere formalmente definita anche nei termini di *depth-map*, *local-attitude* o *gradient-space*<sup>3</sup> come illustrato nella Figura 6. La combinazione delle due dà luogo all’immagine, che è l’unica informazione disponibile al sistema percettivo e agli algoritmi formali. È quindi necessario operare delle assunzioni per recuperare l’informazione relativa alla forma e alle proprietà di riflessione.

Adelson e Pentland propongono la “*workshop metaphor*” per spiegare il modo in cui viene determinata la soluzione percettiva e algoritmica: un percetto deve corrispondere alla spiegazione più semplice o saliente. Si tratta di un approccio definito “minimizzazione della funzione di costo”. Anche secondo Attneave (1954, 1982), il sistema percettivo seleziona la soluzione più semplice in base a un processo da lui definito “*economical description*” dello stimolo. In maniera simile Hochberg e McAlister (1953) affermano che “meno informazione è necessaria per definire una data organizzazione rispetto alle altre, più probabilmente quella soluzione percettiva sarà scelta”.

Mediante l’uso di tre “*specialisti*” (un carpentiere per la forma, un elettricista per la luce e un pittore per la riflettanza) è possibile creare tre soluzioni ipotetiche, ognuna con un certo costo di realizzazione. Un’immagine, infatti, potrebbe essere determinata sia da variazioni dell’orientamento della superficie, che da variazioni della riflettanza, che da un’adeguata illuminazione. La soluzione scelta computazionalmente è quella per la cui realizzazione vengono spese meno risorse economiche. L’algoritmo implementato permette di spiegare la bistabilità percettiva derivata dallo *shading* monoculare. Le soluzioni in un percetto bistabile hanno lo stesso costo e la scelta tra le due è casualmente dipendente dalla condizione iniziale.

---

<sup>2</sup> In questo caso il termine *image* non è da intendersi come immagine bidimensionale propriamente detta, bensì come rappresentazione di un costrutto 3D o 2½D, per cui una traduzione efficace potrebbe essere “mappa”.

<sup>3</sup> per la trattazione del *gradient-space* vedi Sezione 1.1.1.

---

**Percezione dello spazio e indizi pittorici**

In condizioni pittoriche, la percezione della tridimensionalità, della profondità e delle forme è dovuta ad alcuni *indizi* o *cue* che apportano informazioni salienti per il sistema percettivo (Norman, Todd e Phillips, 1995): *shading*, prospettiva, occlusione, bordi, eccetera. Il sistema percettivo è capace di sfruttare le informazioni fornite dagli *indizi pittorici* per recuperare la forma spaziale degli oggetti.

Sono state fatte molte ricerche per determinare il ruolo dei *cue* geometrici nella percezione spaziale, ma i lavori su quelli fotometrici sono molto minori. Naturalmente, nell'interazione che abbiamo ogni giorno con l'ambiente che ci circonda, una delle fonti preminenti della percezione della tridimensionalità è dovuta alla parallasse binoculare e alla parallasse di movimento, ma in questa tesi verrà presa in esame soltanto l'informazione in *un* punto di osservazione statico (quella normalmente chiamata appunto informazione pittorica).

L'importanza del make-up nel teatro, l'utilizzo dell'ombreggiatura in molte forme d'arte, l'illuminazione nelle riproduzioni fotografiche per far risaltare alcune caratteristiche suggeriscono che il sistema percettivo incorpora alcuni processi per inferire la forma dal chiaroscuro.

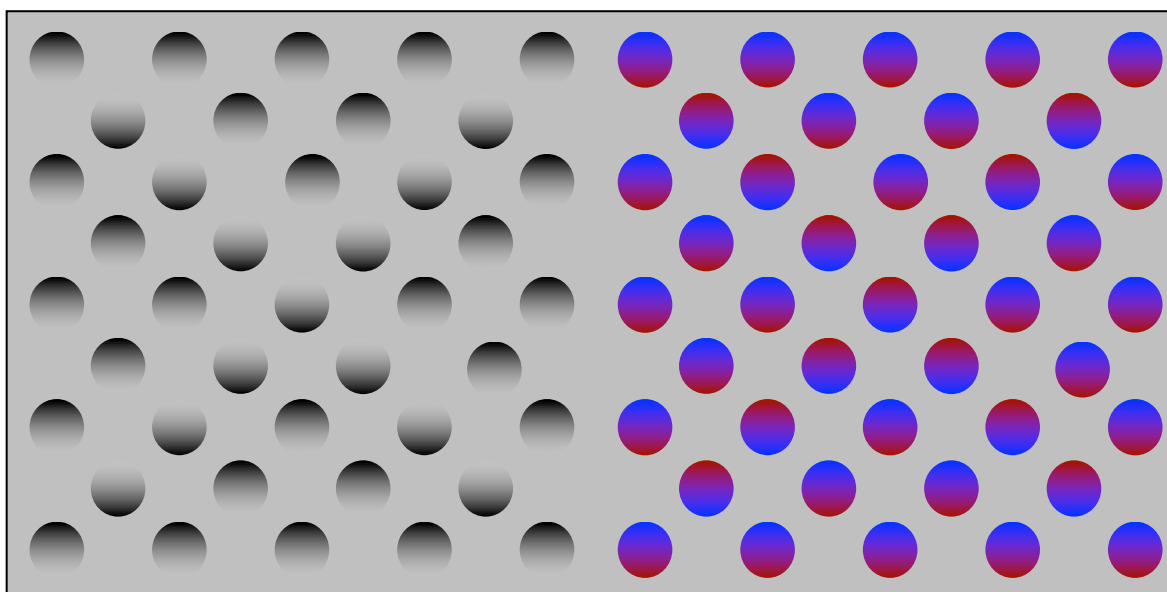
Probabilmente, il meccanismo che determina la forma degli oggetti dall'ombreggiatura (*shape-from-shading*) è uno dei più primitivi. Molti animali, infatti, si sono evoluti adottando delle contromisure per rendersi meno visibili ai predatori. Tra queste vi è il fenomeno del “*countershading*” (Cott, 1941) che appiattisce la forma percepita dell'animale. Molte specie, infatti, presentano una colorazione scura nell'area dorsale e chiara in quella ventrale. Ciò permette di annullare gli effetti di un'illuminazione che proviene prevalentemente dall'alto (vedi Arnheim, 1954). Grazie a quest'espedito, viene ridotta la differenza nella luce riflessa dalle due parti dando al corpo un colore omogeneo. Kácha e Petr (1996) evidenziano che il *counter-shading* è presente anche nei ritrovamenti fossili. Ferguson, Messenger e Budelmann (1994) dimostrano che nella *Sepia Officinalis* il fenomeno è sensibile all'orientamento e alla direzione di provenienza della luce.

### **Informazione dallo shading**

Sembra che l'efficacia del chiaroscuro sia limitata. L'informazione relativa allo *shading* permette di determinare solo in parte la forma dell'oggetto (ad esempio Todd e Mingolla, 1983; Todd e Reichel, 1991; Sezione 1.2.1), ciò produce, in alcuni casi, un percetto bistabile (ad esempio Ramachandran, 1988ab; Paragrafo 1.2). Spesso, infatti, è necessario che l'informazione venga combinata con quelle derivanti da altre sorgenti (come, ad esempio, il contorno).

Nella letteratura sono stati evidenziate tre tipi di analisi dell'informazione.

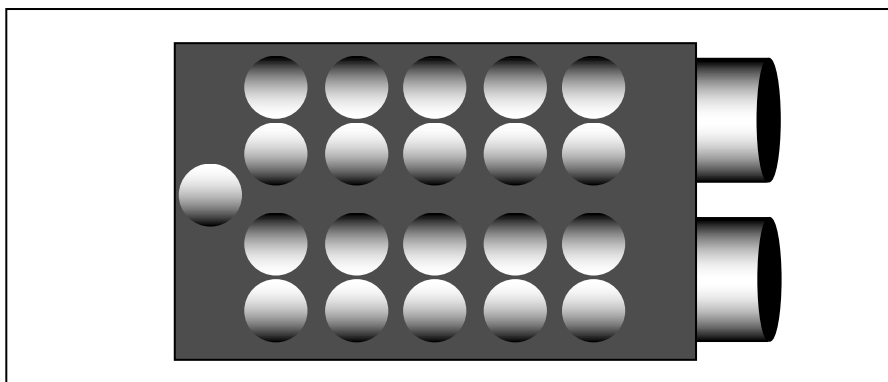
1. È stato ipotizzato che l'informazione sulla profondità e sulla forma veicolata dallo *shading* venga estrapolata sin dai primi stadi di analisi percettiva (ad esempio Sun e Perona, 1997). Tale informazione potrebbe servire a sua volta da input per ottenere informazioni di livello più elevato tramite elaborazioni successive. Braun (1993) dimostra come tale *cue* abbia molte caratteristiche simili ai *texton* (le prestazioni dei soggetti sono indipendenti dall'attenzione, l'analisi può procedere in parallelo).



**Figura 7: SEGREGAZIONE DOVUTA A *SHADING* E STIMOLO ISOLUMINANTE DI CONTROLLO.**

Treisman (1982), Julesz (1971) e Beck (1972) hanno inserito questo *cue* nei loro modelli come caratteristica elementare (vedi Figura 7). Esso può perciò servire al raggruppamento percettivo (Kleffner e Ramachandran, 1992), alla detezione della specularità, alla segregazione figura-sfondo, ed alla percezione del movimento apparente e non.

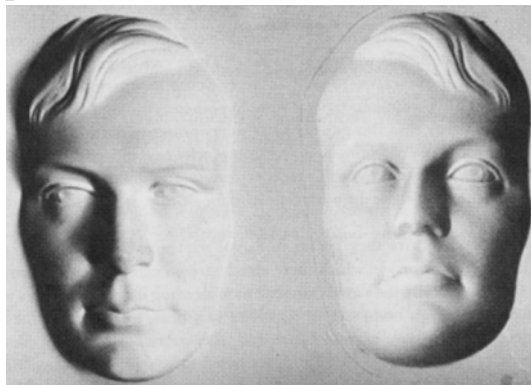
2. È da notare come il recupero della forma tridimensionale degli oggetti possa essere influenzata, da un lato, da assunzioni che semplificano il problema (come la provenienza dall'alto della luce basata sul solo orientamento retinico), ma, dall'altro, venga complicata dall'interpretazione “ad alto livello” della scena. La seguente Figura 8, ad esempio, può essere percepita alternativamente come una serie di figure tridimensionali concave e convesse (“conche” e “uova”), oppure come un foglio bucato attraverso il quale si vedono due cilindri.



**Figura 8: FIGURA AMBIGUA.** Coprendo la parte sinistra dell'immagine la configurazione viene percepita più facilmente come un foglio bucato con due cilindri. Coprendo la parte destra, invece, sembra che sul foglio ci siano dei *bump*. Modificata da Ramachandran (1988).

3. Anche la conoscenza a priori della forma di un oggetto interagisce con l'analisi percettiva. Il sistema percettivo ha una spiccata preferenza per le forme familiari (Gregory, 1970/1980). L'interpretazione dello stimolo da parte del sistema visivo è influenzata dalle conoscenze pregresse che modificano la scelta di una soluzione percettiva. Nell'illusione detta *hollow-mask* (Figura 9), il sistema visivo assume che la forma in questione sia

convessa perché è la soluzione più frequente. In questo caso, anche se questa assunzione risulta falsa, alcune informazioni presenti nella scena vengono trattate di conseguenza per fornire un quadro d'insieme compatibile. In particolare, la direzione di provenienza della luce viene ricodificata, perché l'ombreggiatura del volto sia con essa coerente, l'eventuale informazione stereoscopica non viene utilizzata.



**Figura 9:** “IL ‘VOLTO’ SULLA DESTRA È DI FATTO LO STAMPO DI QUELLO DI SINISTRA, MA APPARE CONVESSO.” Le informazioni che darebbero luogo a un percelto concavo sono reinterpretate al fonte di mantenere quest’ipotesi altamente probabile (ma non corretta a livello fisico). Gregory, 1980, p. 193.

### ***Tipo di misurazione***

Se non è facile definire cosa sia la forma di un oggetto è ancora più difficile verificare come essa viene percepita. Non vi è accordo, infatti, sul tipo di compito da affidare al soggetto per poter registrare univocamente ciò che percepisce, in quanto una percezione consistente e dettagliata come quella fornita dai *cue* monoculari non implica una conformità con l’oggetto fisico. Nella letteratura del settore sono stati utilizzati i seguenti compiti.

- Misura della forma globale. Questo tipo di compito permette di avere solo una valutazione della percezione nella sua totalità, misurata secondo i seguenti indici:
  - Stima della sezione (Todd e Mingolla, 1983; Seyama e Sato, 1988);
  - “Apparenza tridimensionale” (Cavanagh e Leclerc, 1989);
  - Riconoscimento della forma simulata (Erens, Kappers e Koenderink, 1993).

- Valutazione dell'orientamento *locale*, con criteri diversi:
  - Mediante manipolazione di una “*gauge figure*” (Koenderink, van Doorn Kapper, 1992);
  - A voce (Mingolla e Todd, 1986).
- Valutazione di profondità relativa (Todd e Reichel, 1989; Reichel e Todd, 1990).
- Valutazione di profondità stereoscopica (Koenderink, Kappers, Todd, Norman e Phillips, 1996).
- Parametri di curvatura:
  - Discriminazione dei valori di curvatura (Johnston e Passmore, 1994a);
  - Bisezione di archi e allineamento geodetico su sfere (Johnston e Passmore, 1994b);
  - Tipo e quantità di curvatura (Koenderink, 1990; Mamassian, Kersten e Knill, 1996), vedi indici S e C più sopra.

# Capitolo 1 *Shape-from-shading*

«Parendo a me le ombre essere di somma necessità nella prospettiva, perochè senza quelle i corpi oppachi e cubi male siano intesi... »

Leonardo Da Vinci, in Richter (1953), Vol. 1 Num. 111.

In questo capitolo si vogliono affrontare i due approcci al problema dello *shape-from-shading*: quello formale, proprio dell'intelligenza artificiale e della *Computer Vision*, basato sulla realizzazione di simulazioni e quello percettivo teso alla determinazione sperimentale delle prestazioni umane.

Abbiamo già detto come l'immagine ombreggiata di un oggetto contenga informazione sulle condizioni che la hanno determinata. Considerandolo come un'estrazione di informazione, il problema dello *shape-from-shading* è identico sia per il sistema visivo umano che per la *Computer Vision*. Tuttavia, anche se esistono molte soluzioni matematiche tutte ugualmente possibili per una stessa immagine, un osservatore può avere un solo percetto alla volta. L'analisi delle possibili soluzioni matematiche per determinare l'insieme delle soluzioni e per sceglierne una può aiutare la comprensione dei meccanismi percettivi suggerendo alcune modalità di risoluzione dei problemi implicati.



## **Paragrafo 1.1    *Della forma***

«L'occhio vede tutto. Salvo se stesso»

**Alessandro Moandotti**

Nella *Computer Vision*, lo scopo ultimo è di implementare algoritmi che, data una distribuzione di luce in input, possano recuperare la geometria e la riflettanza delle superfici che la hanno determinata. I modelli della *Computer Vision*, possono essere confrontati con le ipotesi sul funzionamento dei sistemi visivi naturali (biologici). La *Computer Vision*, tuttavia, risulta estremamente difficoltosa anche per scene molto semplici.

Questo paragrafo affronta il problema dell'analisi formale dello *shape-from-shading*, utilizzando i contributi forniti dai principali modelli computazionali e matematici. Ciò permetterà di comprendere meglio quali siano i vincoli sulle informazioni disponibili al sistema visivo umano e quali potrebbero essere le possibili modalità di risoluzione del problema percettivo di determinazione della forma dallo *shading*.

### **Modelli**

Esistono diverse teorie che descrivono come si possa ricostruire la forma di un oggetto dato un pattern di intensità ed eventualmente alcune conoscenze o assunzioni addizionali. Queste si possono suddividere in due gruppi, che verranno analizzati nel dettaglio nelle seguenti sezioni del paragrafo.

Il primo tipo di teorie considera il meccanismo dello *shape-from-shading* come la computazione del processo inverso alla generazione

dell'immagine. Siccome non esiste una relazione biunivoca tra la quantità di luce riflessa verso l'osservatore e la forma dell'oggetto, devono essere aggiunte delle conoscenze esplicite o *vincoli* per poter ottenere una soluzione. Questo è l'approccio di Horn (1970, 1977). Todd e Mingolla (1983) criticano le assunzioni di Horn che invece sembra essere sostenute da Pentland (1981, 1982) che modifica alcuni dettagli dell'approccio per renderlo più semplice ed allo stesso tempo più plausibile. Infatti, Horn non considera la validità psicologica del modello e richiede molta conoscenza riguardante le funzioni di riflessione della superficie nonché le condizioni di illuminazione.

Il secondo gruppo di analisi formali è stato sviluppato da Koenderink e van Doorn (1980, 1982). Essi dimostrano che le luminanze di un'immagine risultano globalmente determinate: la posizione di particolari pattern detti "*singularità*", la tipologia dei gradienti e le isofote (linee che collegano i punti che hanno la stessa luminanza; Koenderink e van Doorn, 1980) hanno delle caratteristiche costanti. Basandosi su queste costanti, non è necessario risalire a quali parametri hanno causato ogni singola intensità dell'immagine. Ciò spiegherebbe la mancata accuratezza nella determinazione delle rappresentazioni umane e la robustezza dovuta a perturbazioni non salienti.

Di seguito verranno presi in considerazione con maggiore dettaglio gli approcci di Horn, Pentland, Koenderink e van Doorn.

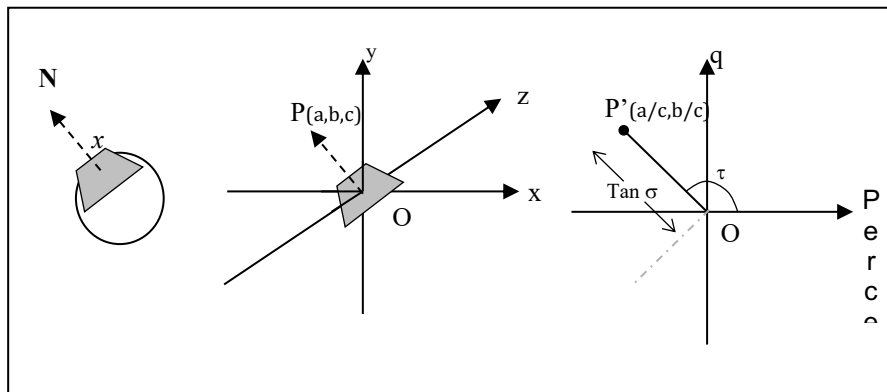
### **Sezione 1.1.1 Shape-from-shading matematico**

#### ***Gradient-space***

Horn (1975) ha descritto le funzioni differenziali che pongono in relazione l'intensità dell'immagine e l'orientamento della superficie nel caso in cui vi sia un'illuminazione elementare, ossia non siano presenti interazioni tra le superfici (trattate nel Paragrafo 2.1 e nel Paragrafo 2.2) e la riflettanza della superficie rimanga costante e sia data a priori. Horn

(1977) ha poi riformulato il suo lavoro nei termini di *gradient-space*. Ciò permette di semplificarne la comprensione, perché è un modo elegante di rappresentare l'orientamento della superficie. Tuttavia, non è una formulazione che preserva l'apparenza esteriore degli oggetti, ma piuttosto una descrizione in uno spazio bidimensionale che specifica l'orientamento locale della superficie (Bülthoff e Mallot, 1990; Johnston e Passmore, 1994; Burigana, 1999). Tale rappresentazione è stata resa popolare da Huffman (1971) e Mackworth (1973) in una situazione diversa.

Supponendo di avere una superficie senza punti di discontinuità<sup>4</sup>, ogni punto  $x$  della superficie ha uno e un solo piano tangente, di conseguenza ha anche una sola normale<sup>5</sup>. Su un sistema cartesiano (vedi Figura 10), dunque, si può riportare la normale  $\mathbf{N}$  come il segmento  $OP$  che ha come estremi l'origine e il punto  $P$  con coordinate  $(a, b, c)$ . La lunghezza di  $OP$  è arbitraria, per questo  $P$  potrebbe essere ricodificato con le coordinate  $(a/c, b/c, 1)$ . È quindi possibile rappresentare  $P'$ , in un sistema bidimensionale  $p$ - $q$ , avente le coordinate  $P'(a/c, b/c)$ . Questo è il punto nel *gradient-space* che rappresenta l'orientamento della superficie. Le coordinate  $p$  e  $q$  corrispondono a  $p = \partial z / \partial x$  e a  $q = \partial z / \partial y$  in modo che  $\mathbf{N}$  abbia il valore di  $(-p, -q, 1)^T$  (Burigana, 1999) e la profondità della superficie possa essere espressa con l'equazione  $z = px + qy + \text{costante}$  (Wechsler, 1990).



**Figura 10: Superficie, normale trasposta all'origine e ricodifica nel *gradient-space*.**

<sup>4</sup> Ciò che in inglese è espresso dal termine *smooth*, per cui questa assunzione viene detta *Smoothness-assumption*. In tal caso la funzione della *depth-map*  $f(x, y)$  non ha punti in cui la derivata prima sia indefinita.

<sup>5</sup> Geometricamente, le normali dovrebbero essere due, ma in letteratura e soprattutto nella Computer Graphics, viene considerata solamente la normale uscente. Vedi Capitolo 3.

La distanza del punto P' dall'origine rappresenta la tangente di  $\sigma$ , ossia l'angolo “*slant*” di inclinazione del piano tangente da quello frontoparallelo. Può essere posto in relazione a  $p$  e  $q$  con la formula  $\tan(\sigma) = \sqrt{(p^2 + q^2)}$ . L'angolo  $\tau$ , invece, è il “*tilt*”, ossia la quantità di rotazione rispetto alla verticale ed equivale a  $\tau = \arctan(q/p)$ .



Figura 11: VARIAZIONE DELLO *SLANT* E DEL *TILT*.

### Proprietà di riflessione

Lo studio dello *shape-from-shading* è la ricerca di un modo per determinare l'orientamento e la forma delle superfici, data una serie di valori di intensità in un'immagine della una scena. Il problema non ha una soluzione univoca, perché le intensità non dipendono dal solo orientamento della superficie, ma anche dalla struttura della scena e dalla funzione di riflessione della superficie. Nel mondo reale, l'illuminazione è difficile da descrivere esaurientemente, specialmente in ambienti chiusi (vedi Paragrafo 2.2 e Paragrafo 2.4). La situazione è complicata dagli effetti dell'illuminazione secondaria, ossia dalla riflessione della luce che una superficie trasmette ad un'altra, e da quelli della mutua illuminazione, dal fatto, cioè, che due superfici s'illuminino vicendevolmente. La porzione di luce riflessa verso l'osservatore, inoltre, dipende dalle proprietà di riflessione della superficie ed è descritta mediante una funzione dei tre angoli in figura seguente. Uno dei metodi usati nella Computer Graphics per rappresentare la quantità di irradianza della superficie che viene riflessa verso l'osservatore è detta *Bi-directional Reflectance Distribution Function* (BRDF)

$$f(\theta_L, \phi_L, \theta_V, \phi_V) = \frac{\delta L(\theta_V, \phi_V)}{\delta V(\theta_L, \phi_L)}$$

che indica la quantità di luce riflessa nella direzione  $\mathbf{V}$ , data un'illuminazione  $\mathbf{L}$  come indicato nella seguente figura.

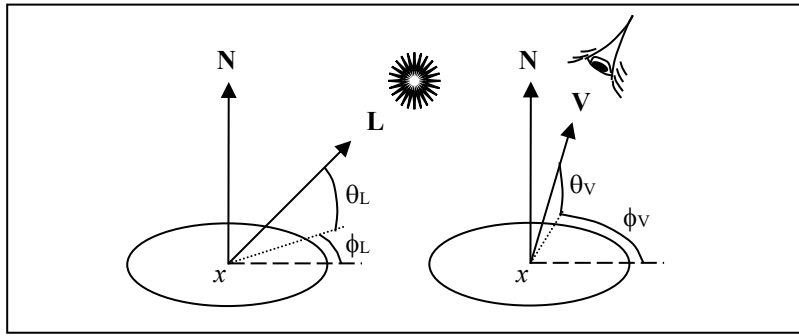


Figura 12: ANGOLI DELLA BRDF.

Questo tipo di espressione risulta, tuttavia troppo complessa nella definizione della riflessione per un'analisi generale. Nel nostro caso è sufficiente tenere presente gli angoli relativi tra i vettori e non quelli assoluti. Per questo motivo si preferisce utilizzare la *funzione di riflettanza*  $\phi(i, e, g)$ . Tale equazione è definita dagli angoli nella Figura 13 e determina la frazione della luce incidente riflessa verso l'osservatore per ogni unità d'area della superficie e per ogni unità di angolo solido.

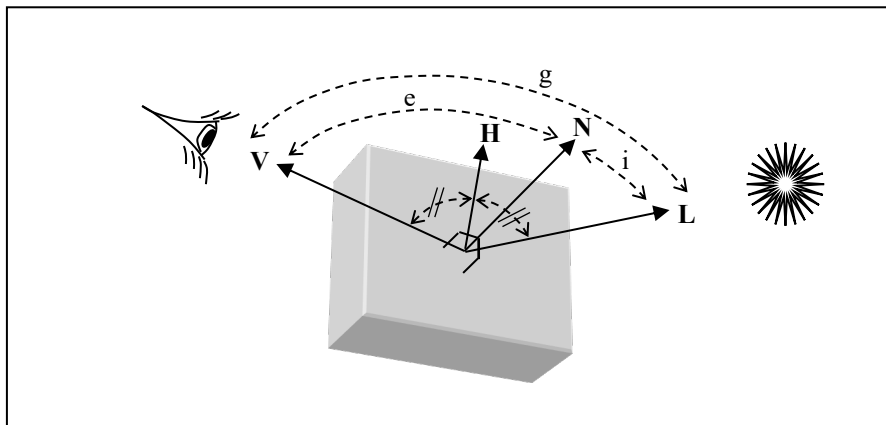


Figura 13: ANGOLI IMPLICATI NELLO SHADING.

$i$ , di *incidenza* tra la normale della superficie e la sorgente;  
 $e$ , di *emittenza* tra la direzione di osservazione e la normale alla superficie;  
 $g$ , di *fase* tra la direzione di illuminazione e la direzione di osservazione.

$N$ ,  $V$ ,  $L$  ed  $H$  sono dei versori che rappresentano la normale alla superficie, la direzione di osservazione, la direzione di illuminazione e la bisecante dell'angolo compreso tra gli ultimi due.

Esistono diversi tipi di funzioni di riflettanza, dipendenti dalla microstruttura del materiale.

- Una superficie perfettamente lambertiana, completamente opaca, risulta egualmente luminosa in tutte le direzioni ed ha una funzione di riflessione del tipo

$$\phi(i, e, g) = \cos(i)$$

Il nome deriva da Johann Heinrich Lambert matematico e filosofo tedesco del '700, il quale formulò la cosiddetta legge di Lambert (o del coseno o di Lambert-Beer), descritta tramite le due relazioni fotometriche:

- Un fascio luminoso di raggi paralleli, produce su una superficie piana, obliqua rispetto alla direzione di propagazione, un illuminamento (flusso luminoso per unità di area) proporzionale al coseno dell'angolo formato dalla direzione di propagazione  $L$  e dalla normale  $N$  alla superficie.
- Il flusso luminoso uscente da una superficie irraggiante in un angolo solido, il cui asse forma l'angolo  $i$  con la normale della superficie, è proporzionale al coseno di  $i$ .
- Le superfici di rocce molto friabili, osservate da lontano (ciò accade ad esempio guardando la luna), hanno una proprietà di riflessione particolare: essendo  $g$  costante, l'emittanza non cambia per ogni punto della superficie (*"reflection of Maria in the moon"*, Horn, 1977).

$$\phi(i, e, g) = \frac{\cos(i)}{\cos(e)}$$

- Una superficie metallica lucida ha una funzione di riflettanza molto semplice, equivalente alle proprietà di uno specchio perfetto:

$$\begin{cases} i = e \rightarrow \phi = 1 \\ i \neq e \rightarrow \phi = 0 \end{cases}$$

- Quando la superficie di questo tipo non è perfettamente liscia,  $\phi$  è esteso rispetto a questo valore con una funzione gaussiana.

$$\phi(i, e, g) = \frac{s(n+1)(2\cos(i)\cos(e) - \cos g)^n}{2}$$

Il termine  $s$  corrisponde alla frazione di luce riflessa specularmente e  $n$  equivale all'ampiezza del picco di componente speculare (un valore tipico per le vernici lucide è  $n=16$ ) (vedi Todd e Mingolla, 1983).

- Le superfici che incontriamo ogni giorno possiedono una funzione che è la combinazione di questa componente speculare e di quella opaca. Per esempio (Horn 1977), la funzione di riflessione di una superficie bianca lucida equivale

$$\phi(i, e, g) = \frac{s(n+1)(2 \cos(i) \cos(e) - \cos g)^n}{2} + (1-s) \cos(i)$$

ai due termini, il primo speculare ed il secondo opaco.

È possibile rappresentare i diversi comportamenti delle superfici nella riflessione mediante un grafico radiale (Figura 14), dove per ampiezze maggiori, si registrano riflessioni maggiori.

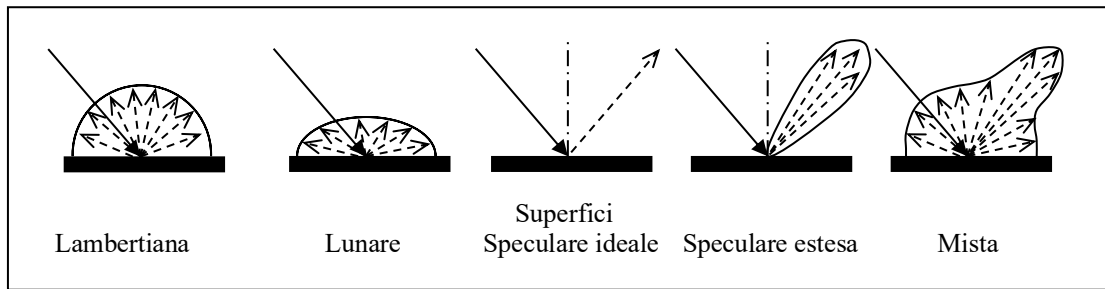
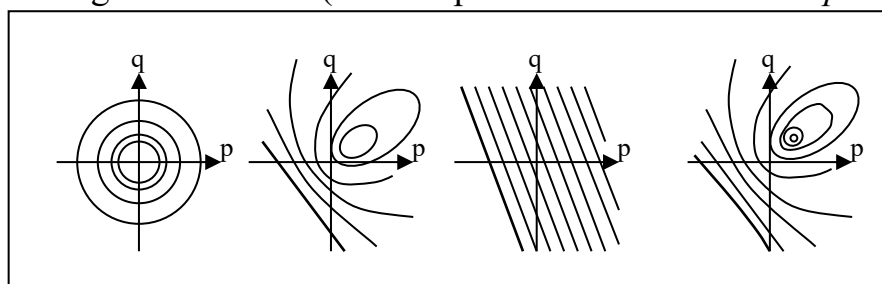


Figura 14: DIVERSE FUNZIONI DI RIFLETTANZA.

### Reflectance-map

Assumendo che la superficie sia *smooth*, cioè che sia differenziabile ovunque (senza spigoli in cui la normale non sia definibile univocamente), Horn (1977) ha dimostrato che è matematicamente possibile determinare il punto nel *gradient-space* corrispondente ad una data intensità. Per farlo si deve ricorrere alla “*reflectance-map*”, una rappresentazione che specifica l'intensità dell'immagine in funzione dell'orientamento locale della superficie nello spazio bidimensionale  $p$ - $q$  del *gradient-space* quando si suppone un'osservazione a distanza infinita (proiezione parallela che mantiene costante l'angolo  $g$ ), una sorgente luminosa singola e a distanza

infinita (i cui raggi di luce risultino, quindi, paralleli). Ciò permette di riassumere le proprietà da cui dipende la quantità di luce riflessa dalla superficie. Ogni orientamento della superficie, infatti, produce una determinata intensità dell'immagine riportata nel *gradient-space* (vedi Figura 15). Per cui, data una certa intensità in un punto, l'orientamento ( $p$ ,  $q$ ) in quel punto deve trovarsi nella zona che ha quel valore della funzione di riflettanza. Ciò tuttavia non è sufficiente, poiché *ogni* punto dell'area che ha quel valore risulta equivalente. In altri termini, normalizzando l'intensità d'immagine e la *reflectance-map* esse risultano identiche<sup>6</sup> (ossia la relazione tra lo spazio  $x$ - $y$  del piano immagine e quello  $p$ - $q$  del *gradient-space* è  $I(x,y)=R(p,q)$ , Worthington e Hancock, 1999). La relazione ottenuta, tuttavia, non è univoca: si devono fare delle assunzioni per eliminare dei gradi di libertà (ad esempio la *smoothness-assumption*).



**Figura 15: REFLECTANCE-MAP DI OGGETTI DIVERSI NEL GRADIENT-SPACE.** Ogni rappresentazione si riferisce rispettivamente a superfici: lambertiana con luce vicino all'osservatore; lambertiana, lunare e lucida con luce in alto a destra.

Un altro metodo matematico, utilizzato per semplificare il problema dello *shape-from-shading*, è il “*photometric stereo*” (Woodham 1978; Marr 1982). Esso consta nell'utilizzo di più immagini dello stesso oggetto sottoposto a diverse illuminazioni (P. 249): “... una tecnica per determinare la forma data una mappa della riflettanza che non può avere nessuna significatività biologica..”. L'idea è stata introdotta da Woodham (1978) e applicata anche da Horn. Essi si sono basati sul fatto che, ottenendo due diverse intensità di immagine per ogni punto, è possibile selezionare due punti di intersezione delle due corrispondenti aree di intensità nella *reflectance-map*. Ciò elimina molte delle ambiguità relative

<sup>6</sup> L'equazione di irradianza dell'immagine postula che la chiarezza dell'immagine sia proporzionale alla radianza nel punto corrispondente alla superficie.



all'orientamento della superficie in un dato punto, ma apre il problema della convessità/concavità, riscontrato nelle prestazioni dei soggetti, e della direzione di provenienza della luce.

### **Conclusioni**

L'approccio di Horn, utilizzando i vincoli sull'orientamento, permette di determinare la forma di un oggetto dato un pattern di *shading*. Ciò significa quindi che il chiaroscuro da solo veicola informazioni rilevanti e sufficienti al fine di determinare la forma degli oggetti. Tuttavia, anche se la soluzione algebrica è stata dimostrata, ciò non significa che sia applicabile anche dai sistemi biologici. Per risolvere le equazioni dello *shape-from-shading*, così come sono state impostate da Horn, è necessario computare degli integrali successivi lungo dei percorsi determinati soltanto durante la computazione.

### **Sezione 1.1.2 Analisi locale**

Le assunzioni necessarie all'approccio di Horn sono difficilmente giustificabili per una teoria della visione umana: non tutte le superfici naturali sono *smooth*, esse non devono obbligatoriamente essere osservate da lontano, possono essere trasparenti o proiettare ombre e, soprattutto, l'osservatore non conosce a priori le proprietà di riflessione dei materiali. Per questi motivi Pentland (1982) ha proposto un approccio diverso per la descrizione della performance del sistema percettivo, basato sull'implementazione di meccanismi fisiologici conosciuti.

Esistono diversi approcci alternativi locali: Woodham (1978) ha combinato dei vincoli sull'orientamento della normale (minimizzando le variazioni della curvatura locale) e sullo *shading* per applicare un processo

iterativo locale; altri ha ristretto la gamma di possibili forme analizzate per determinare la direzione di provenienza della luce. Tuttavia, questi approcci locali funzionano soltanto in alcune situazioni semplificate, quindi non possono essere basati su meccanismi simili a quelli usati dal sistema percettivo.

L'algoritmo di Pentland è vincolato dal fatto che le superfici abbiano una riflessione di tipo lambertiano, tuttavia non richiede la conoscenza della direzione di illuminazione (anche se uno dei moduli computa innanzitutto la direzione di illuminazione per dare l'informazione al modulo di recupero della forma). L'approccio usa molti concetti della geometria differenziale locale: converte variazioni locali di intensità in stime locali dell'orientamento valutandone la coerenza, in quanto ogni gradiente può essere prodotto da una sfera con superficie lambertiana. Alla fine dell'analisi, gli orientamenti locali sono combinati per essere integrati in una superficie. I risultati evidenziano una ricostruzione della superficie che risulta esatta solamente in maniera parziale. Infatti, gli oggetti ricostruiti hanno una forma tridimensionale con una profondità minore a quella reale. Anche se ciò risulta problematico dal punto di vista computazionale, ha una certa valenza psicologica: l'algoritmo rispecchia le prestazioni dei soggetti (vedi Sezione 1.2.2).

### **Informazione in un punto**

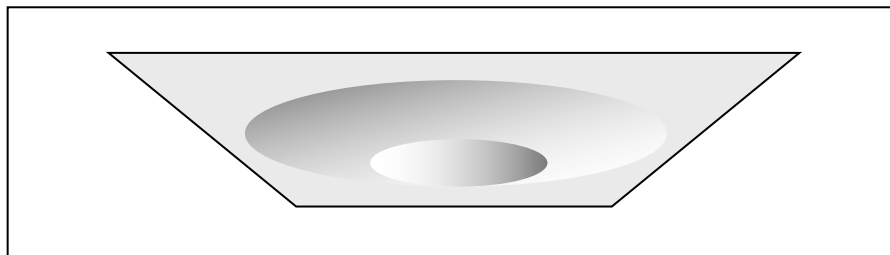
Pentland (1984) afferma che il primo passo nell'analisi percettiva è di tipo locale: questo stadio è importante per determinare quale informazione sarà elaborata dal sistema percettivo. Se si ricava già localmente una descrizione degli oggetti sufficientemente ricca, il resto del sistema dovrà affrontare un compito meno gravoso. Ci sono molte dimostrazioni in grado di rivelare che il sistema percettivo opera in questo modo. L'informazione presente intorno a un punto è generalmente limitata a piccole variazioni di *shading* (è statisticamente improbabile che un bordo passi per un punto).

Secondo Pentland l'approccio usato da Horn presupponeva molte conoscenze a priori, per questo non risulta facilmente applicabile ad un'immagine nuova. Bruss (1985), invece, ha dimostrato come le tecniche

di *shape-from-shading* applicate localmente non portino a una soluzione univoca, pur utilizzando comunque una certa quota di conoscenze a priori. Per specificare le intensità di un'immagine nei dintorni di un punto su una superficie lambertiana, infatti, è necessario conoscere la normale alla superficie, il raggio della curvatura, la direzione dell'illuminante e il prodotto dell'albedo per l'intensità di illuminazione. Pentland evidenzia la limitatezza delle informazioni locali derivanti dallo *shading*: l'intensità dell'immagine locale dipende dalla normale della superficie, ed esistono diverse superfici con la stessa normale; ugualmente, le derivate parziali dell'intensità in un punto non possono descrivere l'intera gamma di superfici. Egli propone di semplificare l'analisi locale restringendo le possibilità di variazione: postulando che i segni delle curvature principali siano uguali<sup>7</sup>.

### Curvatura

Tale riduzione, tuttavia, non risulta ancora sufficiente per determinare la convessità o la concavità. Con una superficie lambertiana non è possibile determinare la convessità senza assunzioni sulla provenienza della luce. Nella Figura 16, l'informazione data dall'ombreggiatura non è sufficiente a determinare la direzione di provenienza della luce. Quando la direzione della provenienza della luce (derivata o imposta all'algoritmo) cambia, cambia anche la forma tridimensionale, passando da un "avvallamento" ad una "cupola" e viceversa.



**Figura 16: LA CRATER-ILLUSION.** Fra le varie soluzioni matematicamente possibili ci sono le due che compongono il percolato bistabile umano (provare a girare il foglio sottosopra). Riadattata da Pentland 1984.

<sup>7</sup> Vedi Figura 2, p. 4.

Postulando l'uguaglianza del segno delle curvature principali, inoltre, non è più possibile rappresentare tutti i tipi di forme naturali, mancano ad esempio quelle a "sella".

È importante determinare se le curvature principali sono nulle: ciò permette di capire se la forma della superficie nel punto considerato è piana, cilindrica o curva nelle due direzioni. Inoltre, spostandosi lungo la direzione a curvatura zero, la normale non cambia. La determinazione di tali linee permette di suddividere la superficie in zone con la stessa curvatura. Per di più, i cosiddetti *zero-crossing*<sup>8</sup> dell'intensità dell'immagine nelle regioni omogenee spesso sono situati nelle vicinanze delle linee cilindriche.


### **Direzione di illuminazione**

La stima della direzione di provenienza della luce è confusa dal fatto che i valori dell'intensità dell'immagine dipendono in eguale misura dalle normali della superficie e dalla posizione dell'illuminante. Per poterla effettuare, quindi, è necessario fare delle assunzioni sull'orientamento della superficie. Un'assunzione molto utile è che la curvatura sia distribuita isotropicamente in ogni punto della superficie. Ciò è vero per la maggior parte degli oggetti convessi, ma non per ogni scena naturale. Grazie a questa semplificazione la maggior parte dell'informazione sulla direzione dell'illuminante proviene dalle zone in cui è presente una cospicua variazione dell'intensità luminosa.

Grazie a questa nuova informazione dovrebbe essere possibile ottenere anche il verso della convessità dell'oggetto, giacché il segno della derivata prima della distribuzione delle luminanze dipende dalla direzione di provenienza della luce.

L'ambiguità rimasta sulla direzione di curvatura della superficie riflette la prestazione dei soggetti umani: quando la scena è troppo semplice per determinare la direzione di provenienza della luce, la posizione dell'illuminante ha due soluzioni alternative che determinano la convessità o la concavità dell'oggetto percepito.

---

<sup>8</sup> Uno *zero-crossing* è un punto in cui la seconda derivata dell'intensità dell'immagine passa da negativo a positivo (Marr, 1982), ossia ha una forma del tipo:  (ad esempio Grimson, 1981).

Nelle immagini reali la descrizione lambertiana non risulta sufficiente. Ciò obbliga ad abbandonare l'analisi puntiforme della superficie. Pentland propone un'analisi regionale, la quale permette di determinare dei parametri medi per ogni zona. Il valore medio può essere utilizzato in due modi: assumendo che ogni punto della zona abbia lo stesso valore, quindi la validità del parametro è determinata dalla varianza all'interno dell'area, oppure considerandolo come proprietà media della regione, perciò la validità è dettata dall'accuratezza della stima (come accade ad esempio in Figura 16 e in Figura 17).

### **Conclusioni**

L'approccio di Pentland porta a dei risultati interessanti per la comprensione dei meccanismi percettivi di analisi del chiaroscuro. Oltre che risolvere computazionalmente il problema dello *shape-from-shading*, questo metodo esibisce prestazioni simili a quelle umane e non le famigerate soluzioni matematicamente perfette.

Le forme ricostruite, infatti, hanno una profondità inferiore a quella simulata e nei casi in cui rimangono delle ambiguità sulla soluzione finale, l'algoritmo ottiene due soluzioni ugualmente "buone". Come vedremo in seguito il sistema percettivo si comporta in maniera simile e ciò non perché l'algoritmo è stato progettato con lo scopo di emularle, ma forse perché entrambi adottano le stesse strategie. Ciò potrebbe quindi indicare che anche le modalità di analisi implicate nella percezione siano di tipo locale.

### Sezione 1.1.3 Analisi delle feature

Uno dei problemi degli approcci tradizionali allo *shape-from-shading* è che il pattern dell'ombreggiatura viene considerato una funzione della normale (forma locale), senza analizzare l'influenza delle altre superfici (forma globale).

Esistono diversi modi di considerare la globalità delle immagini negli algoritmi. Uno dei più frequenti utilizza l'informazione data da “*feature*” locali. Non è univocamente definito cosa sia esattamente, ma nella pratica la nozione è legata alle vicinanze spaziali del punto trovato da un algoritmo che riconosce una precisa distribuzione di luminanze. Infatti, anche Koenderink (1993) propone che si possa definire *feature* una proprietà dell'attività strutturata di un gruppo di operatori matematici che rappresentino esattamente la forma geometrica locale. Forsyth e Zisserman (1990), invece, propongono un approccio diverso: essi cercano di determinare quali siano le proprietà invarianti di una superficie nonostante l'illuminazione passiva.

#### Primitive

Haddon e Forsyth (1988) hanno elaborato un algoritmo per riconoscere quelle che definiscono “*shading primitive*”: pattern di luminanze dovute alla mutua illuminazione locale.

Essi sostengono che il loro metodo non risulta così complicato come potrebbe sembrare a prima vista, apportando come esempio il fatto che per le pieghe e le scanalature (*fold* e *groove*) i pattern di *shading* sono relativamente indipendenti dalla loro forma e risultano localmente determinati. Koenderink e van Doorn (1993) rivelano che profondi avvallamenti e scanalature hanno delle proprietà fotometriche caratteristiche. Uno degli aspetti salienti dell'analisi è che i pattern di *shading* ad elevata frequenza spaziale o ampiezza non possono essere dovuti a superfici radianti passive molto distanti. Anche se gli avvallamenti risultano essere piccoli, hanno delle ingenti conseguenze sull'immagine. Ciò che semplifica estremamente l'analisi è invece la consistenza del pattern per forme differenti: nell'analisi degli autori si evince che molti tipi di forma determinano lo stesso tipo di proiezione sul piano-immagine.

Il metodo presenta un altro vantaggio: quello di usare semplici filtri per determinare la forma senza dover inferire le proprietà di illuminazione. In seguito viene integrato un terzo tipo di primitiva: i cilindri. Infatti, grazie all'algoritmo per la detezione delle simmetrie nelle immagini è possibile riconoscerli facilmente.

### ***Invarianti***

Anche Koenderink e van Doorn (1980, 1982) propongono un approccio globale per la descrizione della superficie che non necessita della conoscenza della posizione della sorgente luminosa. Esistono, infatti, determinate regolarità nell'interazione della luce con gli oggetti: gli autori apportano come esempio il fatto che la pupilla delle statue sia realizzata tramite un foro, perché così risulta essere più scura in qualsiasi condizione di illuminazione. Essi definiscono tre tipi di *singularità* su una sfera Gaussiana (una rappresentazione che permette di far corrispondere i punti della superficie con quelli della sfera che hanno la stessa normale), validi nel caso siano presenti solamente effetti locali dell'interazione delle superfici con la luce, che rimangono costanti al variare dell'illuminazione:

- Le singolarità di primo tipo (*apici*) sono i punti in cui la normale alla superficie e la direzione di provenienza della luce coincidono, per questo su quello in direzione dell'illuminazione è presente un massimo locale di luminanza. Queste zone non cambiano al variare del punto di vista con superfici lambertiane, ma si spostano al variare della direzione di illuminazione. Possono essere presenti in qualsiasi punto della superficie, ma è più probabile riscontrarne sulle zone con curvatura maggiore. Si creano e scompaiono assieme ad un *saddle point* su linee paraboliche, trasversalmente al quale si muovono.
- Le singolarità di secondo tipo (*saddle point*) sono le aree con luminanza minima che si riscontrano al confine tra regioni ellittiche ed iperboliche (curvature paraboliche). Nelle loro vicinanze le isofote sono parallele alle linee paraboliche indifferentemente dalla direzione di illuminazione. Si spostano

solo per effetto dell'illuminante ed appaiono e spariscono generalmente insieme a un punto di massimo.

- Le singolarità di terzo tipo (*highlight*), che non compaiono nelle superfici opache, hanno luogo dove la normale della superficie coincide con la bisecante dell'angolo tra la direzione dell'osservatore e quella di illuminazione. Appaiono più spesso sulle zone con curvatura maggiore. Si spostano sia modificando il punto di vista che l'illuminazione e spariscono a coppie su linee paraboliche, trasversalmente alle quali si spostano.

Il secondo tipo di singolarità risulta essere percettivamente saliente, in quanto indipendenti dalla forma solida.

Un'altra costante è la direzione delle isofote delle linee paraboliche, in quanto proiezione della direzione di illuminazione: ruotando una superficie attorno alla normale di un punto, le isofote che passano per quel punto ruotano nella stessa direzione se la superficie è ellittica, nella direzione contraria se iperbolica e rimangono ferme se parabolica (le isofote incrociano sempre le linee paraboliche con un angolo costante).

### **Conclusioni**

L'approccio allo *shape-from-shading* mediante *feature* può essere considerato in qualche modo come l'integrazione globale di informazioni ricavate localmente. Visto così, questo approccio ha molto in comune con quello di Pentland. Entrambi, infatti, permettono di utilizzare semplici filtri per l'analisi o la detezione locale. In più hanno il vantaggio di essere biologicamente plausibili, perché questa modalità di funzionamento è simile a quella di alcuni neuroni del CGL.



## **Paragrafo 1.2    *Della sostanza***

Gli approcci di teorici volti alla spiegazione del fenomeno dello *shape-from-shading* hanno in comune l'uso di modelli che semplificano il problema e non sono esplicitamente basati sui dati delle prestazioni umane o su meccanismi percettivi. Non vi sono prove, infatti, che il sistema percettivo assuma inizialmente che le superfici abbiano funzione di riflessione lambertiana, che la direzione di illuminazione debba essere stimata all'inizio dell'analisi e che la forma globale di un oggetto sia ottenuta integrando l'orientamento locale (Mingolla e Todd, 1986). In questo paragrafo si vuole fare un *excursus* sulle capacità del sistema visivo di interpretare lo *shading*.

Nell'ambito degli studi sulla percezione dello *shading*, una delle linee di ricerca degli ultimi venti anni è stata la determinazione delle assunzioni che il sistema visivo compie, ed in particolare la verifica della valenza psicologica delle assunzioni utilizzate nell'ambiente della *Computer Vision* per la semplificazione dell'analisi dell'immagine (ad esempio Berbaum, Bever e Chung, 1983; Erens, Kappers e Koenderink 1993; Kleffner e Ramachandran, 1992; Mingolla e Todd, 1986; Ramachandran, 1988abc; Todd e Mingolla, 1983). Altri studiosi si sono concentrati sulla capacità di estrarre la forma dalle immagini (Bülthoff e Mallot, 1988; Todd e Reichel, 1989; Mingolla e Todd, 1986; Koenderink, van Doorn e Kappers, 1992; Koenderink 1990; Mamassian, Kersten e Knill 1996; Erens, Kappers e Koenderink, 1993; Todd e Mingolla 1983; Johnston e Passmore, 1994a). Un altro ambito della ricerca è l'integrazione

degli indizi di *shading* con quelli provenienti da altre fonti (Bülthoff, 1991; Bülthoff e Mallot, 1988, 1990; Curran e Johnston, 1994; Erens, Kappers e Koenderink, 1993; Ramachandran, 1988b). Infine un ultimo settore può definirsi quello della verifica della costanza di forma nella variazione delle condizioni di illuminazione (Mingolla e Todd, 1986; Johnston e Curran 1996) e della stima della direzione di illuminazione (Pentland 1982; Todd e Mingolla, 1983).

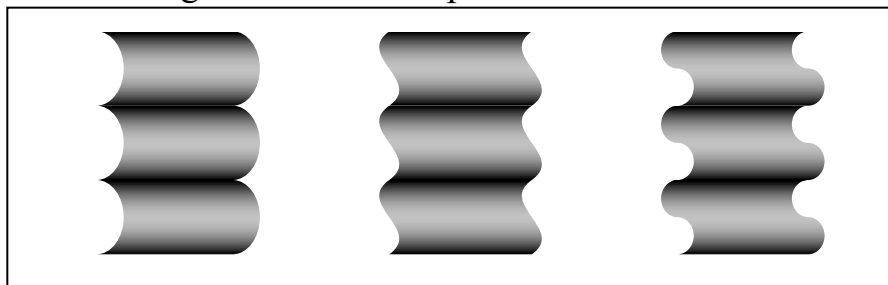
### **Panoramica**

Le immagini generate tramite la grafica tridimensionale computerizzata forniscono sufficienti informazioni per la percezione della forma degli oggetti (Gibson, 1950; Johnston e Curran, 1996). Tuttavia, il fenomeno dello *shape-from-shading* non è semplice, in quanto le intensità di ogni punto dell'immagine non sono univocamente determinate: data una sola immagine dell'oggetto è necessario che il sistema percettivo faccia delle supposizioni per eliminare l'ambiguità. In letteratura è riportato che i più frequenti *cue* inferiti sono la posizione dell'illuminante e le proprietà della superficie (ad esempio Horn, 1977; Pentland, 1984, 1989). In più, vi è una spiccata propensione nel percepire gli oggetti simulati come tutti convessi oppure concavi. Non è chiaro se ciò sia dovuto alla tendenza ad assegnare la stessa profondità a tutti gli oggetti oppure all'assunzione di un illuminante unitario ed univoco. Ramachandran (1988b) ha cercato di rispondere a questa domanda presentando dei pattern molto semplici che dimostrano come il presupposto di un'unica fonte di luce posta in alto determini la concavità e la convessità degli oggetti. Questo principio è stato suggerito per primo da Sir David Brewster nel 1826 e dipende dal fatto che le superfici orientate verso l'illuminante risultano più chiare. Ramachandran ha dimostrato come l'oggettiva conoscenza dell'"alto" non intacchi la percezione, essendo l'estrazione dell'informazione dovuta alle sole coordinate retiniche e non dall'ambiente.



**Figura 17: REVERSIBILITÀ DELLA PROFONDITÀ PERCEPITA CON E SENZA BORDI. Provare a girare il foglio.**

Anche se gli stimoli della Figura 18 è presente un bordo (perciò non si può definire puro *shape-from-shading*), Ramachandran (1988a) ha indicato come sia possibile variare la direzione di illuminazione percepita: quando un oggetto ha una forma percepita precisa, la chiarezza relativa delle sue parti suggerisce una direzione prevalente di illuminamento. Indizi simili possono essere l'occlusione (e quindi i contorni illusori), la stereopsi, il movimento apparente e lo *structure-from-motion* tridimensionale, ma per quanto riguarda le differenze cromatiche gli studiosi sono tuttora divisi. Le interpretazioni date dallo *shading* e da altri *cue* di profondità, se congruenti si rinforzano reciprocamente, e quindi anche la direzione della provenienza della luce viene adeguata dal sistema percettivo.



**Figura 18: VARIAZIONE DELLA DIREZIONE PERCEPITA DI ILLUMINAZIONE. Lo stesso Ramachandran afferma che la percezione dipende esclusivamente dai bordi sagomati delle figure, in quanto l'informazione data dallo *shading* è ambigua. Le intensità nelle tre figure sono identiche. Riadattata da Kleffner e Ramachandran, 1992.**

Johnston e Passmore (1994c) hanno messo in evidenza che la profondità percepita di un oggetto potrebbe dipendere dalla distanza di osservazione dell'immagine: con distanze maggiori gli oggetti appaiono più piatti di quanto lo siano realmente; ad osservazioni ravvicinate, invece, sembrano estendersi maggiormente in profondità.

### **Sezione 1.2.1 Interpretazione dello shading**

Lo spazio pittorico è lo spazio non tangibile rappresentato nelle immagini tridimensionali. Per alcuni versi appare simile al vero spazio tridimensionale in cui viviamo, ma per altri presenta forti differenze. Infatti, se le dimensioni  $x$  e  $y$  sono legate a quelle dell'immagine, la dimensione della profondità, invece, non ha una relazione immediata con l'immagine (in certi punti, ad esempio, potrebbe essere indeterminata, oppure avere una definizione di tipo esclusivamente ordinale).

L'interpretazione dello spazio pittorico non si basa sulle stesse sorgenti di informazione utilizzate nello spazio tridimensionale (sono diverse, ad esempio, le informazioni di parallasse binoculare e accomodamento). Infatti, la visione monoculare aumenta la percezione di profondità pittorica, ma la diminuisce nello spazio reale (Koenderink, van Doorn e Kappers, 1995). Gli osservatori utilizzano delle competenze acquisite basandosi sulle leggi dell'ottica ecologica che legano la struttura delle scene alle immagini che se ne possono ricavare (Burigana, 1999). Tuttavia, sembra che nella percezione della profondità pittorica non vi sia una completa separazione dal meccanismo utilizzato per lo spazio fisico (Koenderink, van Doorn, Kappers, 1994), ma piuttosto una diversa assegnazione di pesi ai fattori implicati. Forse uno dei meccanismi per l'acquisizione di queste capacità di interpretazione avviene in maniera probabilistica (Gregory, 1980) per permettere di utilizzare le informazioni presenti nei "*depth cues*". Ciò spiegherebbe il diverso assegnamento di pesi per ogni soggetto riscontrabile confrontandone le risposte.

Koenderink e van Doorn (1980; 1982) affermano che il processo di analisi delle informazioni di *shading* sia fondamentalmente globale e non locale, come invece sostengono ad esempio Horn (1970) e Pentland (1982). Le analisi formali descritte in precedenza, cioè, non sarebbero sufficienti a descrivere il processo sottostante allo shape-from-shading. Sono stati ipotizzati diversi tipi di influenze nell'analisi: apprendimento, *pattern-recognition*, *ecological-constraints* (Wechsler, 1990), accidentalità (Gregory, 1970), generalità della scena (Freeman, 1996). Ad esempio, a parità di altre condizioni, l'ombreggiatura può essere sufficiente ad inferire

la profondità percepita sulla base dell'assunzione che la luce provenga dall'alto (Brewster, 1826; Ramachandran, 1988abc) e da sinistra (Sun e Perona, 1997, 1998). Una dimostrazione di quest'ipotesi è l'impossibilità di vedere i due "oggetti" in Figura 17 come contemporaneamente convessi o concavi. Ciò suggerisce, quindi, che il sistema percettivo assuma che tutta la scena sia illuminata da una sola sorgente luminosa<sup>9</sup>. Tale regola risulta essere più rigida se applicata a diverse parti di uno stesso oggetto piuttosto che a due oggetti distinti. Anche quest'osservazione dimostrerebbe l'aspetto globale dello *shape-from-shading* e fa supporre che proprio questa globalità sia implicata anche nella percezione della chiarezza delle superfici (Gilchrist, 1979).

La percezione determinata dallo *shading* migliora se le informazioni fornite risultano coerenti. Kleffner e Ramachandran (1992) dimostrano che in condizioni di stimolazione con informazioni contraddittorie, lo *shading* può essere interpretato come variazione di riflettanza, piuttosto che di profondità (vedi anche Adelson e Pentland, 1996, trattato a p. 9).

### **Contrasto**

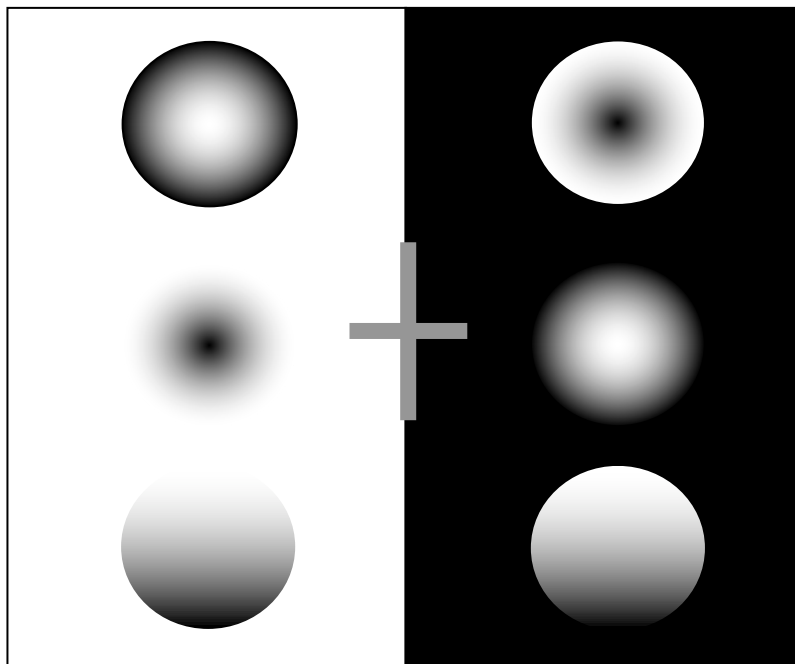
Per influenzare la distanza apparente di una superficie è sufficiente la bianchezza. Gli esperimenti di Kleffner e Ramachandran (1992) rivelano come il sistema percettivo assume che lo sfondo sul quale giacciono gli oggetti tridimensionali possiede la stessa riflettanza degli oggetti. Le prestazioni dei soggetti, infatti, sono migliori quando la luminanza dello sfondo equivale alla luminanza media degli oggetti con ombreggiatura. Al contrario, quando lo sfondo è troppo chiaro oppure troppo scuro, la segregazione percettiva è molto inferiore.

I risultati di Egusa (1983) e di Schwartz e Sperling (1983) indicano, invece, che più un oggetto contrasta con il proprio sfondo, più vicino appare all'osservatore. Probabilmente è anche per questo motivo che Kleffner e Ramachandran (1992) registrano una maggior segregazione percettiva quando gli stimoli presentati giacciono su uno sfondo con uguale luminanza media. Essi propongono che il sistema percettivo incorpori l'assunzione che lo sfondo abbia la stessa riflettanza della scena. Una delle

---

<sup>9</sup> Questo fenomeno viene definito "*single light-source assumption*".

prime ricerche in tal senso riguarda la PCL (*Proximity-Luminance Covariance*) ed è stata condotta da Schwartz e Sperling (1983). Essi dimostrano come la stabilità nella percezione del KDE indotta dalla prospettiva polare può essere inficiata correlando l'intensità delle linee rappresentate sul monitor alla vicinanza rispetto all'osservatore. Infatti, i soggetti percepiscono le parti chiare di una configurazione come più vicine. Tuttavia, gli studiosi puntualizzano che non è la luminanza di per sé il fattore cruciale: con figure *wire-frame* su sfondo chiaro, sono le parti più scure quelle che risultano percettivamente più vicine. Da quest'evidenza propongono che sia il contrasto (oppure un indice simile come la particolarità o visibilità) a segnalare al sistema percettivo la vicinanza. I dati degli esperimenti, inoltre, supportano l'idea che la percezione di tridimensionalità è basata su *cue* locali combinati in un'immagine globale con un processo cooperativo/competitivo.



**Figura 19: ESEMPIO DI COME IL CONTRASTO POSSA INFLUENZARE LA FORMA PERCEPITA.** Le figure della prima riga “si staccano” dalla superficie, mentre quelle della seconda ne fanno parte (la direzione del gradiente, inoltre, modifica la forma percepita, supportando l'idea dell'interpretazione dell'illuminazione diffusa). Le figure della terza riga, invece, appaiono orientate diversamente, con la parte che contrasta più vicina all'osservatore. L'effetto più forte si ottiene con osservazione monoculare e fissando la crocetta.

---

### Sezione 1.2.2 Solid shape

Generalmente si considera il *cue* dato dallo *shading* come poco informativo, se confrontato con altri *cue* di profondità (Bülthoff e Mallot, 1988; Cavanagh e Leclerc, 1989; Todd e Reichel, 1989). Sembra che i giudizi di forma possano essere consistenti (bassa variabilità), ma alquanto inaccurati (elevato *bias*). La mancanza di precisione nel giudizio della forma tridimensionale degli oggetti hanno indotto Todd e Reichel (1989) a suggerire che la rappresentazione derivata sia grossolana e basata su relazioni ordinali. Ikeuchi e Horn (1981) propongono che l'informazione fornita dallo *shading* apporti una mera informazione stabilizzatrice quando è aggiunto ai bordi degli oggetti (il problema dei bordi sarà trattato in dettaglio nel Paragrafo 2.5). Anche Ramachandran (1988a) afferma che la percezione dipende esclusivamente dai bordi sagomati delle figure, in quanto l'informazione data dallo *shading* è ambigua.

#### Tipi di forma

Johnston e Passmore (1994a) hanno dimostrato come sia possibile identificare diverse forme di un oggetto rappresentato mediante lo *shading*, anche se tale *cue* risulta comunque insufficiente nella determinazione della profondità relativa di due punti distinti.

In due esperimenti, Mamassian (1995) dimostra che il sistema percettivo ha una spiccata preferenza per le superfici ellittiche (piuttosto che iperboliche, a forma di sella), utilizzando l'informazione data dallo *shading* e dal contorno occludente. Tale risultato è stato confermato anche dai dati di Mamassian e Kersten (1996). I soggetti ingenui riconoscono meglio gli oggetti concavi piuttosto che quelli convessi, forse perché le cavità sono le unità standard del sistema percettivo (Ramachandran, 1988a). Tuttavia, Curran e Johnston (1995) dimostrano come in assenza di altre sorgenti di informazione, la concavità/convessità percepita dipenda dal giudizio del soggetto sulla direzione dell'illuminazione prevalente. Una delle ambiguità più evidenti nell'interpretazione della profondità da parte del sistema percettivo è evidenziata dalla *crater-illusion* di Brewster

(1826)<sup>10</sup>. Anche Gibson (1950b) e Ramachandran (1988b) hanno affrontato il problema della reversibilità percettiva. Le conclusioni cui sono giunti avvalorano l'ipotesi che il sistema percettivo sfrutti delle assunzioni a priori nella interpretazione dello *shading*, ossia che gli oggetti siano illuminati dall'alto. Queste conclusioni saranno trattate nella successiva Sezione 1.2.3.

### **Orientamento percepito**

Todd e Mingolla (1983) affermano che lo *shading* risulta essere un *cue* meno informativo della *texture* nella percezione della tridimensionalità. Nel loro esperimento il giudizio di curvatura di una superficie cilindrica mostra un coefficiente di regressione .67 con superfici lucide e .47 con superfici opache. La direzione dell'illuminazione percepita con lo stesso stimolo ha un coefficiente di regressione di .63 con superfici lucide e .68 con superfici opache. I risultati ottenuti supportano l'analisi di Pentland, in quanto è presente una sottostima della profondità di circa il 50%, attribuibile alle limitate strategie con cui il sistema visivo userebbe l'informazione di *shading*.

Un altro risultato che si potrebbe trarre dalla ricerca è l'indipendenza del giudizio di curvatura dalla direzione di illuminazione. I risultati dei due autori del 1986 rivelano un errore nella stima di orientamento maggiore di 13°. Mamassian e Kersten (1996) riscontrano una sottostima dello *slant* ed una grande variazione del *tilt* nelle risposte dei soggetti, ma le stime di orientamento risultano migliori con forme locali a uovo, piuttosto che a sella o cilindriche (Koenderink, van Doorn e Kappers, 1992, avevano registrato in precedenza un pattern di errore esattamente contrario). In entrambi gli studi le risposte sono consistenti tra misure ripetute, tuttavia vi è una differenza di scala notevole tra soggetti. In alcuni esperimenti si riscontra un effetto dello *slant* simulato della percezione del *tilt* (Mamassian e Kersten, 1996).

---

<sup>10</sup> Vedi Figura 16.



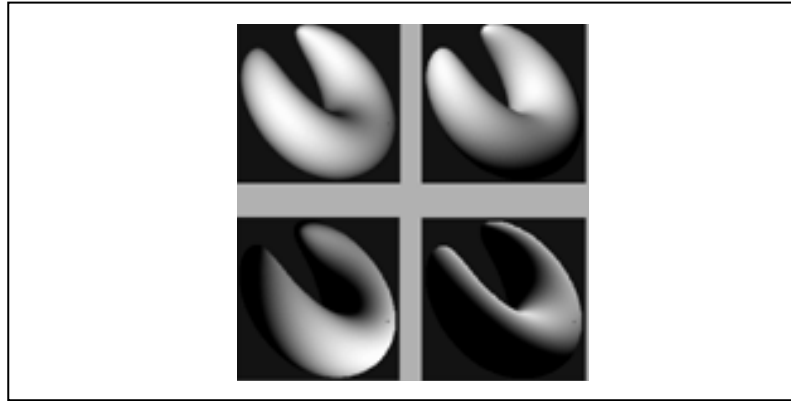


Figura 20: Stimolo usato da Mamassian e Kersten, 1996.

Nell'esperimento di Christou, Koenderink e van Doorn (1996), lo *slant* viene sottostimato del 25%, ma  $R^2$  della regressione con la direzione simulata è circa uguale a 1 (mentre con la *texture* risulta essere 0.5). Le superfici piane favoriscono il giudizio del *tilt* (errore  $3.7^\circ$ ), mentre la prestazione peggiora con quelle quadratiche e soprattutto cilindriche. Mamassian e Kersten (1996) registrano una sottostima dello *slant* percepito quando quello simulato risulta superiore a  $20^\circ$  ed una sovrastima lineare negli altri casi<sup>11</sup>. Lo stesso risultato è riscontrabile anche con figure definite da altri tipi di *cue*. Le superfici con errore inferiore risultano essere localmente ellittiche. Questo dato è in accordo con l'assunzione della sfericità locale di Pentland (1984), tuttavia gli autori suggeriscono che una delle cause possibili per gli errori di valutazione dei punti iperbolici potrebbe essere l'illuminazione indiretta.

La sottostima dello *slant* riscontrata nei giudizi di orientamento locale potrebbe essere un artefatto dovuto alla sovrastima della profondità del probe, oppure ad un errore nella percezione dell'orientamento globale dell'oggetto. Johnston e Passmore (1994) suggeriscono che il compito affidato ai soggetti richiede di valutare degli attributi non direttamente codificati dal sistema percettivo. Infatti i dati da loro raccolti (come quelli di Johnston ea, 1991) evidenziano una frazione di Weber per la discriminazione di curvatura con valori vicini a quelli ottenuti mediante indizi stereoscopici, mentre la soglia di discriminazione dello *slant* è 10

<sup>11</sup> Ciò potrebbe essere dovuto al tipo di *reflectance-map* utilizzata dal sistema percettivo, come evidenziato alla Sezione 1.2.4.

volte maggiore (Johnston e Passmore 1994a; 1994b). Anche Todd e Reichel (1989) hanno affermato che l'approccio basato sulle stime di orientamento locale ha scarsa rilevanza percettiva o psicologica. I dati raccolti da Johnston e Passmore (1994c), ad esempio, evidenziano l'indipendenza tra la quantità di curvatura percepita e l'orientamento locale.

### ***Profondità percepita***

Todd e Mingolla (1983) hanno evidenziato nelle risposte dei soggetti una sottostima della profondità degli oggetti simulati mediante una superficie lambertiana e una sovrastima con quelle lucide. Anche Bülthoff e Mallot (1983) hanno evidenziato un pattern di risposte simile. Koenderink, van Doorn e Kappers (1994) registrano un errore maggiore nel giudizio di profondità relativa quando viene misurata direttamente, piuttosto che derivandola dalle misure di orientamento locale. Come suggeriscono Mamassian e Kersten (1996), ciò è probabilmente dovuto al fatto che lo *shading* non è di per se un *cue* di profondità, che può essere ottenuta solo tramite l'integrazione dell'orientamento delle superfici (un procedimento sensibile al rumore). Anche Koenderink, van Doorn e Kappers (1995) sostengono tale ipotesi, avvalorata dal fatto che le superfici ricostruite dai giudizi di orientamento esibiscono un *bias* costante solamente nella profondità. Ciò determina un ordine corretto delle profondità, ma un errore nella valutazione della profondità relativa in punti diversi dello schermo (Johnston e Passmore, 1994a).

### **Sezione 1.2.3    *Direzione di illuminazione***

È importante che il sistema percettivo ricavi anche da fattori accidentali delle proprietà stabili per poter determinare la costanza di forma di un oggetto (Christou e Koenderink, 1996; Gregory, 1980). Sembra logico aspettarsi, infatti, che una singola immagine fornisca sufficienti informazioni per poter discernere le successive variazioni nell'apparenza

delle scene dovute a cambiamenti ambientali e non strutturali. Seguendo questo principio, anche il meccanismo di *shape-from-shading* dovrebbe risultare indipendente dall'orientamento dell'illuminante in rapporto all'oggetto, perché potrebbe variare sia nello spazio che nel tempo.

### **Single light**

In generale, la forma degli oggetti è determinata più facilmente se l'informazione presentata è compatibile con la presenza di una sola sorgente luminosa (Ramachandran, 1988a). Negli altri casi, la profondità percepita è molto inferiore, oppure l'ombreggiatura viene interpretata come una variazione nella riflettanza dell'oggetto. Tuttavia, la regola dell'illuminante unico è più rigida se vengono considerate diverse parti dello stesso oggetto, piuttosto che oggetti differenti. Il sistema visivo non sembra mantenere una rappresentazione della posizione dell'illuminante rispetto a tutta la scena (Tarr, Kersten e Bülthoff, 1998). Ne è un esempio la dimostrazione di Kersten, Mamassian e Knill (1997) detta appunto "*Moving cast shadows induce apparent motion in depth*", nella quale la traiettoria percepita di un oggetto sarebbe determinata dalla sola ombra che il sistema percettivo determina come "sua", non considerando le ombre e i chiaroscuri inconsistenti nella scena, che si muovono in direzioni diverse. Pare, quindi, che la *rappresentazione* dell'illuminazione prevalente sia relativa ad alcune parti di una scena oppure agli oggetti singoli.

### **Luce dall'alto**

Ci sono stati molti tentativi di comprendere se il meccanismo che determina la percezione di una protuberanza dato un pattern di luminanze, composto di un'area chiara sopra ad una scura, sia appreso oppure innato (Metzger, 1936; Von Fieandt, 1938; Sun e Perona, 1997, 1998; Benson e Yonas, 1973; Hagen, 1976; Gregory, 1970, 1980). La maggior parte dei dati definiscono una situazione in cui l'assunto dell'illuminazione dall'alto è un caso speciale dello *shape-from-shading*, che si verifica quando non è specificata esplicitamente la direzione di illuminazione. Da un esperimento di Benson e Yonas (1973) sappiamo che gli adulti considerano la sorgente di illuminazione delle immagini fotografiche loro presentate come

posizionata sopra la fotografia, e non tengono conto dell'orientamento dell'immagine stessa. I soggetti adulti rispondono in accordo con l'informazione dell'ombreggiatura, mentre i bambini, nello stesso compito, seguono questa regola solamente con immagini poste verticalmente, altrimenti assumono che la luce proviene dal soffitto (definizione ambientale dell'orientamento). I dati sono coerenti con l'idea di Piaget sull'acquisizione della coordinazione prospettica a 7-8 anni. La predizione della proiezione dell'ombra, invece, si acquisisce soltanto verso i 10-12 anni. I bambini più piccoli sarebbero incapaci di separare lo spazio visivo all'interno dell'immagine con quello esterno non pittorico.

Hagen (1976) riscontrò un errore nella valutazione della direzione dell'illuminazione di  $76^\circ$  per bambini dell'asilo, di  $40^\circ$  per quelli delle elementari,  $35^\circ$  per quelli delle medie e  $18^\circ$  per quelli delle superiori. Né il tipo di oggetto rappresentato nelle immagini, né la posizione della luce modificava la prestazione. La performance era migliore con *attached-shadow* e *cast-shadow* presentate nella stessa immagine, diminuiva con le sole *cast-shadow* e raggiungeva il minimo con le sole *attached-shadow*. Berbaum, Bever e Chung (1983), mostrando ai soggetti una sorgente fittizia, hanno ottenuto dei dati in cui le *cast-shadow* non sono dei *cue* efficaci per la corretta interpretazione della posizione di illuminazione. Tuttavia, la richiesta di interpretare una figura ambigua come illuminata da una certa direzione, faceva sì che i soggetti percepissero l'immagine come effettivamente illuminata da quel punto. Nelle figure in cui non si vede la posizione della sorgente luminosa, i soggetti pensano che la luce venga dall'alto ed interpretano la direzione della convessità di conseguenza (Brewster, 1826; Gibson, 1950b; Benson e Yonas 1973; Hagen, 1976). Berbaum, Bever e Chung (1984) dimostrano che lo *shading* presente su una mano giustapposta ad una configurazione bistabile può determinare il verso percepito della concavità. Essi sostengono assieme a Hagen (1976) che si può inferire la posizione di un illuminante non visibile mediante la forma delle ombre. L'assunzione della luce in alto sarebbe abbandonata qualora fossero presenti delle ombre proiettate o dello *shading* non ambiguo. La mano, essendo una forma non ambigua, permetterebbe

quest'interpretazione. Lo *shading* di figure non ambigue e le ombre proiettate competerebbero con l'assunzione dell'illuminazione proveniente dall'alto. Pentland (1982) ha eseguito un esperimento per verificare la capacità di determinare la direzione di illuminazione di una sfera. La risposta era data scegliendo uno dei probe raffigurati in un'immagine vicino alla foto della sfera. Le scelte evidenziano una deviazione standard inferiore ai 12° ed un errore medio di 6° (4°-10° per ogni soggetto). I dati di Pentland evidenziano la capacità di determinare la direzione di illuminazione di oggetti reali mostrati in fotografia.

### **Identificazione della direzione di illuminazione**

Gibson (1950b) intuì che le *attached-shadow* apportarono informazioni importanti per la percezione della profondità di oggetti reali: “L'ordinamento dello *shading* è uno stimolo per la profondità..., solamente in relazione all'orientamento dell'osservatore in relazione alla totalità del suo mondo visivo o, più specificamente, al suo orientamento rispetto alla direzione di illuminazione”<sup>12</sup>. Erens, Kappers e Koenderink (1993a) hanno condotto degli esperimenti per testare l'abilità di categorizzazione della forma tramite l'informazione data dallo *shading*. I risultati ottenuti dimostrano come è estremamente difficile determinare la forma di un oggetto quando sia totalmente sconosciuta la direzione dell'illuminazione. Se quest'ultima informazione viene resa evidente dalla presenza di una *cast-shadow*, i soggetti sono capaci di determinare la convessità e la concavità degli oggetti presentati. Lo spostamento dell'illuminante in una sequenza di otto frame fornisce un'informazione sufficiente: l'osservatore può determinare la curvatura della superficie avendo a disposizione diverse distribuzioni dei valori di luminanza dello stesso oggetto. Va tenuto presente che nell'ultimo esperimento era comunque resa evidente la direzione di illuminazione tramite l'ombra portata. Il compito, comunque, non risultava semplice. Pentland (1982) ha proposto un approccio matematico per la determinazione della direzione di illuminazione, senza che fosse indispensabile conoscere la forma dell'oggetto e senza *cast-shadow*. È necessario, tuttavia, che l'oggetto sia concavo e ne siano

---

<sup>12</sup> Gibson, 1972, p. 98.

discriminabili i contorni. È difficile spiegare perché i soggetti percepiscono una sfera come convessa. Si suppone che il sistema percettivo interpreti le aree delimitate da bordi come oggetti convessi.

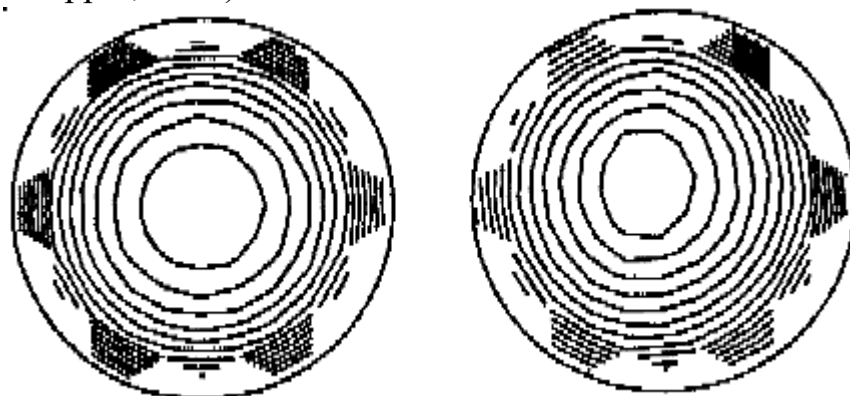
Todd e Mingolla (1983) hanno apportato alcune evidenze a favore dell'analisi di Pentland, mostrando che i soggetti sono in grado di determinare accuratamente la direzione di illuminazione di un oggetto mostrato su un monitor. Nello studio ai soggetti era richiesto di considerare l'oggetto convesso e la direzione di illuminazione compresa in un certo intervallo angolare. Un'altra evidenza a favore dell'analisi di Pentland proverrebbe dall'osservazione di Von Fieandt (1938) sul fatto che, nell'osservazione di immagini ambigue, i soggetti percepiscono più frequentemente forme convesse che concave.

### **Relazione tra forma percepita e illuminazione**

Teoricamente, conoscendo la direzione di illuminazione si può percepire la forma corretta dell'oggetto, e quindi con un oggetto dalla forma non ambigua si può inferire la direzione di illuminazione (Berbaum, Bever e Chung, 1984). Tuttavia, sono stati riscontrati *bias* evidenti nella determinazione della forma da parte del sistema percettivo. Ciò potrebbe essere dovuto alla dipendenza dello *shape-from-shading* dalla determinazione della direzione di illuminazione, oppure al fatto che l'illuminazione non venga considerata.

Koenderink e van Doorn (1980; 1982) hanno dimostrato come nella distribuzione delle luminanze di un oggetto sono presenti diversi tipi di singolarità che apportano un tipo di informazione costante al variare della posizione della luce. Dai loro esperimenti Mingolla e Todd (1986) hanno dedotto che il meccanismo dello *shape-from-shading* non è un processo locale. Mingolla e Todd (1986) dimostrano come i giudizi di *slant* e *tilt* non sono influenzati dalla direzione di illuminazione quando questa è resa maggiormente obliqua. Ciò potrebbe indicare che il sistema visivo determina la percezione dal pattern globale dell'input, senza analizzare la condizione che produce l'immagine. Esisterebbe, in altre parole una dissociazione tra il processo di analisi della direzione di illuminazione e quello di determinazione della forma.

Christou e Koenderink (1996), invece, scoprirono che la percezione della forma è affetta da un *bias* sistematico nella direzione dell'illuminante. Lo stesso risultato è stato ottenuto da Koenderink, van Doorn, Christou e Lappin (1996) e da Koenderink, van Doorn e Kappers (1995). Tale tendenza risulta consistente con una regressione al gradiente di luminanza per figure ellissoidali e si riduce con albedo elevate, dove l'illuminazione passiva rende l'immagine maggiormente dipendente dalla geometria della scena e dall'applicazione di *texture*. Gli esperimenti sembrano delineare un fallimento della costanza di forma al variare dell'illuminazione nel meccanismo dello *shape-from-shading*: una costante tendenza a percepire le parti più chiare in primo piano. In particolare, la ricostruzione dell'oggetto mediante il metodo di Koenderink, van Doorn e Kappers (1992), evidenzia che per illuminazioni oblique vi è una deformazione della forma percepita. I giudizi di *slant* risultano deviati fino a  $4^\circ$  nella direzione della sorgente luminosa. Anche i dati di Koenderink, van Doorn, Christou e Lappin (1996) indicano che il cambiamento generale dell'orientamento percepito può essere stimato nell'ordine dei  $2^\circ$ - $4^\circ$ . Inoltre, la direzione di illuminazione influenza anche la percezione dei rilievi nella figura: il punto percepito come il più vicino risulta essere spostato nella direzione dell'illuminante rispetto a quello reale (Koenderink, van Doorn e Kappers, 1995); la direzione del massimo aumento della profondità percepita coincide con la posizione della sorgente luminosa (Koenderink, van Doorn, Christou e Lappin, 1996).



**Figura 21: DISTANZA REALE E PERCEPITA DI UNA SEMISFERA ILLUMINATA DA SINISTRA IN ALTO ( $45^\circ$ ). Koenderink, van Doorn e Kappers (1995).**

Le risposte sembrano coerenti con la “regressione allo stimolo prossimale” sia in ambito locale (le protuberanze sono deformate verso l’osservatore) che globale (orientamento globale dell’oggetto): i soggetti (inconsapevolmente) giudicano le parti più chiare della figura come più vicine<sup>13</sup>. Curran e Johnston (1995) suggeriscono che la posizione dell’illuminante influenza anche il raggio della curvatura tridimensionale percepito, in quanto, aumentando il *tilt* o diminuendo lo *slant* della sorgente di luce, si riduce la curvatura apparente della sfera usata come stimolo. In altre parole, la curvatura di un *patch* sferico sembra diminuire allontanando l’illuminante dall’osservatore o facendolo ruotare attorno alla linea dello sguardo. In questo senso, sembra che il giudizio di curvatura si basi solo sul contrasto presente nell’immagine (il quale covaria con lo *slant*).

Per poter valutare quale sia il meccanismo che determina questa prestazione, Mamassian e Kersten (1996) computano la direzione di illuminazione più consistente con le risposte dei soggetti: essi combinano il dato di luminanza dei punti con i giudizi di orientamento per tutti i punti della superficie dell’oggetto rappresentato su una sfera gaussiana. Il risultato ottenuto viene fornito come ingresso ad un algoritmo per la stima dell’orientamento locale della superficie. Dai confronti delle stime del modello e dei soggetti essi affermano che i soggetti non fanno uso della stima della direzione dell’illuminazione per determinare l’orientamento locale della superficie (una conclusione equivalente a quella di Mingolla e Todd, 1986). La stima dell’illuminazione più probabile ha un errore di circa 15° rispetto alla direzione veridica, con errori di *slant* maggiori per illuminazioni coincidenti alla linea dello sguardo e dietro all’oggetto. Questi errori potrebbero essere dovuti ai seguenti motivi:

- Imprecisione nel giudizio del soggetto, che implica una scarsa accuratezza del meccanismo di *shape-from-shading*.
- Gli osservatori non stimano la direzione di illuminazione, ma usano lo *shading* sfruttando delle proprietà invarianti come quelle proposte da Koenderink e van Doorn (1980). Ciò determinerebbe l’incompletezza della ricostruzione della forma.

---

<sup>13</sup> Vedi anche p. 37.

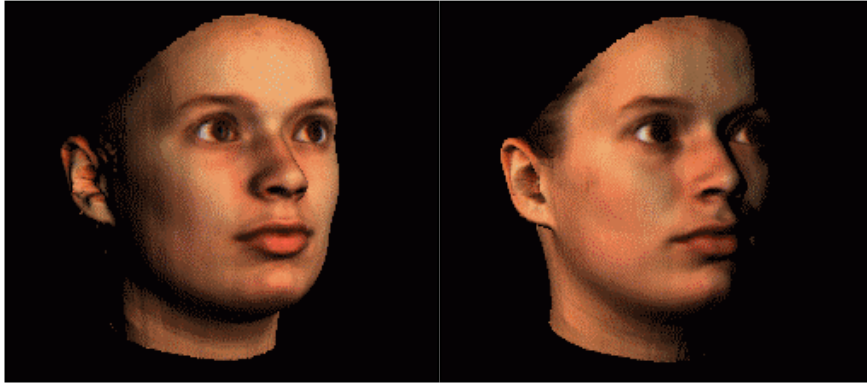


- I soggetti non usano l'informazione data dallo *shading*, ma si basano esclusivamente sull'informazione apportata dai bordi. Questa possibilità è suffragata dalla consistenza delle risposte in presenza ed assenza di *shading*, rilevata da Johnston e Passmore (1994a) e da Mamassian e Kersten (1996).

In un esperimento di *matching* di volti, Hill e Bruce (1996) hanno descritto un deficit della prestazione quando viene cambiato il punto di vista e il verso di illuminazione. Il deficit riscontrato non risulta presente quando cambiano entrambi. Con stimoli diversi (“amebe”) essi riscontrano un deficit solamente per quel che riguarda l'orientamento dell'oggetto. Dai dati raccolti, i ricercatori ipotizzano una dipendenza degli effetti del punto di vista dalla direzione di illuminazione e suggeriscono che entrambi i cambiamenti modificano la stessa sorgente di informazione percettiva.

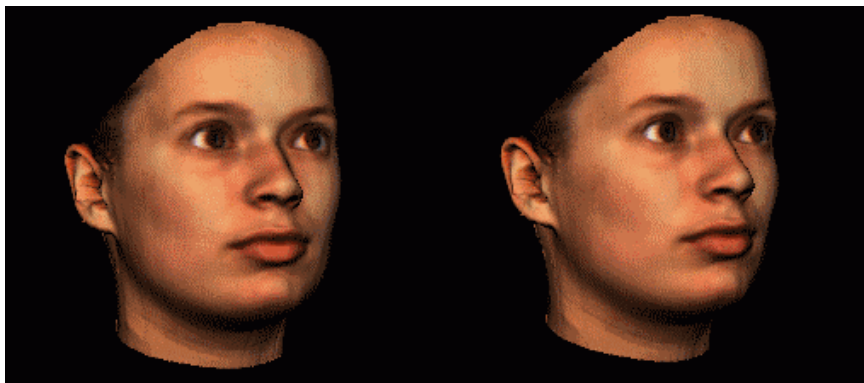
Mamassian, Knill e Kersten (1998) evidenziano l'esistenza dell'assunzione di un illuminante statico nell'interpretazione dello *shading* e delle *cast-shadow*. Questo *perceptual constraint*, un'assunzione del sistema percettivo presente fino a quando non vi sono informazioni contrarie, permetterebbe di ottenere dei percetti rapidi e stabili anche con scene complesse o ambigue. Tale assunzione risulta “ragionevole”, in quanto nelle scene che osserviamo ogni giorno la velocità degli oggetti è sempre maggiore di quella delle sorgenti luminose.

Troje e Siebeck (1998) hanno evidenziato che la posizione della sorgente luminosa che illumina un viso ne induce una variazione dell'orientamento percepito in direzione contraria a quella della luce.



**Figura 22:** Differenza tra lo stesso volto orientato diagonalmente ( $30^\circ$ ) ed illuminato da sinistra e da destra ( $30^\circ$ ). Modificato dal sito alla nota 14.

Gli studiosi definiscono IAOS (*Illumination-induced Apparent Orientation Shift*) la quantità di orientamento necessario a compensare la rotazione percepita<sup>14</sup>. Esso dipende dalla differenza angolare tra due illuminazioni e dall'orientamento del volto. Il massimo valore di IAOS con orientamento frontale del volto è di  $7^\circ$  per una variazione angolare della luce di  $60^\circ$  (la soglia di detezione di una variazione fisica di orientamento è di  $4.4^\circ$ ), mentre aumenta a  $9^\circ$  con orientamenti diagonali del volto.



**Figura 23:** VOLTO CON DIFFERENTE ORIENTAMENTO EQUIVALENTE ALLO IAOS ( $25.5^\circ$  E  $34.5^\circ$ ). Modificato dal sito alla nota 14.

Utilizzando delle superfici ad albedo costante il *bias* non cambia, ma diminuisce fino al valore di  $2^\circ$  con uno sfondo chiaro. Troje e Siebeck sostengono che il giudizio di orientamento globale di una superficie non è indipendente dalla direzione di illuminazione e che ciò non sembra dovuto all'integrazione degli orientamenti locali. Uno dei meccanismi più

<sup>14</sup> Per una dimostrazione in movimento vedere alle risorse Web.

probabili per spiegare quest'effetto è basato sul riconoscimento della linea di simmetria e dei bordi, il che fornirebbe un'informazione efficiente e veloce soprattutto in condizioni di stimolazione impoverita.

### **Conclusioni**

L'unica certezza in quest'ambito della ricerca sembra essere il *bias* del sistema percettivo nell'interpretazione delle scene come se fossero illuminate da un'unica sorgente posta in alto, anche se Reichel e Todd (1990) sostengono che ciò non sia dovuto a fenomeni propri dello *shading*.

Inoltre, per lo *shape-from-shading* non si può quindi affermare che ci sia una vera e propria costanza di forma al variare delle condizioni di illuminazione, ma ciò si verifica anche con altri *cue* di profondità (vedi Todd, van Doorn e Kappers, 1996). Di ciò ringraziano i fotografi, che sanno come addolcire la prominenza di un naso semplicemente spostando una luce. Infatti, la posizione della sorgente luminosa determina una deformazione della forma percepita tale che la *zona più illuminata appare in primo piano*, "*brighter is closer*". Il meccanismo per cui ciò si verifica è tuttora sconosciuto, ma le ipotesi più probabili risultano essere l'assunzione della vicinanza delle zone più luminose e l'interpretazione delle immagini come se illuminate dal punto in di osservazione.

### **Sezione 1.2.4 Reflectance-map percepita**

Todd e Mingolla (1983) hanno evidenziato nelle risposte dei soggetti una sottostima della profondità degli oggetti simulati mediante una superficie lambertiana e una sovrastima con quelle lucide. Questi risultati fanno supporre che ci sia una dipendenza tra la forma percepita e il tipo di riflessione della superficie. In particolare, la differenza tra la *reflectance-map* utilizzata dal sistema percettivo e quella effettiva della superficie potrebbe determinare dei *bias* sistematici nella determinazione della forma tridimensionale degli oggetti. Infatti, un'immagine può essere stata creata da diverse combinazioni di forma e funzione di riflessione (ad esempio

Freeman, 1996), ma se il sistema percettivo fa delle assunzioni su una delle due, l'altra risulta parzialmente determinata.

Le ricerche di Pentland (1989) dimostrano che, nell'interpretazione dello *shading*, le persone assumono una funzione di riflettanza lineare. Egli dimostra che quando la direzione di illuminazione non coincide con il punto di vista, l'intensità dell'immagine è funzione lineare della profondità della superficie. Se, invece la sorgente luminosa è posta vicino all'osservatore, la relazione superficie-immagine è più complessa e dominata essenzialmente da una relazione quadratica con l'orientamento. Illuminando un oggetto da diverse direzioni, è quindi possibile far prevalere una delle componenti. Le risposte dei soggetti sono coerenti con quelle predette mediante un meccanismo lineare e inconsistenti con uno quadratico. Lo studioso dimostra quindi che la *reflectance-function* lambertiana è approssimabile mediante una relazione lineare ed implementa un modello biologicamente plausibile che estrae la *depth-map* da un'immagine senza ricorrere a un processo iterativo. L'algoritmo funziona anche con disegni al tratto.<sup>15</sup>

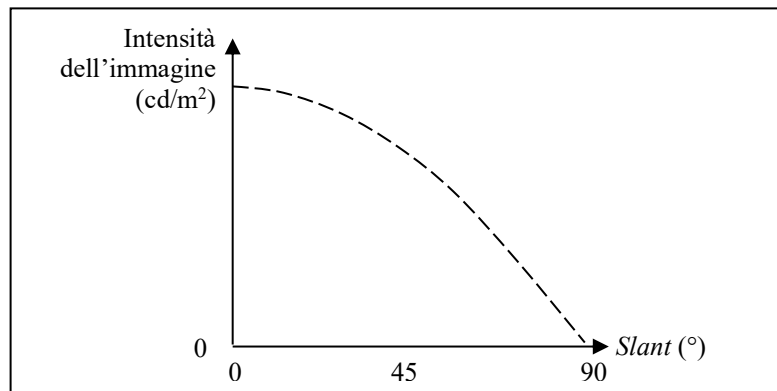
Mingolla e Todd (1986), invece, affermano che il sistema percettivo non debba per forza assumere a priori che le superfici abbiano una riflessione di tipo lambertiano: "Molte assunzioni nella percezione dello shape-from-shading non sono psicologicamente valide. La più evidente è quella per cui il sistema visivo assume che tutte le superfici abbiano una riflessione lambertiana ...".

A tal proposito, Seyama e Takao (1998) osservano che la sottostima di profondità (ad esempio Todd e Reichel, 1989; Bülthoff e Mallot, 1988) e la discrepanza nell'orientamento locale (Norman, Todd e Phillips, 1995) riscontrate in molti studi sullo *shape-from-shading* possano essere dovute alle assunzioni del sistema percettivo sulle proprietà di riflessione della superficie. Gli autori sostengono che il lavoro di Johnston e Curran (1996) sull'equivalenza della prestazione nel confronto di curvatura con oggetti reali e lambertiani simulati non significa necessariamente che il sistema

---

<sup>15</sup> Ciò indica che non è necessario ricorrere alla *smoothness-assumption* per simulare computazionalmente le prestazioni dei soggetti, ma è sufficiente utilizzare una rappresentazione distribuita e multiscalarità dell'orientamento, della frequenza spaziale e della fase.

percettivo assuma una funzione di riflettanza lambertiana. Seyama e Takao (1998) si pongono il problema di qual è la *reflectance-map* usata dai soggetti. Utilizzando degli stimoli cilindrici e sferici con riflessione lambertiana e chiedendo ai soggetti di eguagliare la curvatura percepita, essi stimano qual è il rapporto tra lo *slant* simulato e quello calcolato, derivandone le proprietà di riflessione assunte dal soggetto. Le risposte, infatti, evidenziano una sottostima della profondità percepita. La funzione risultante è esemplificata alla Figura 24.



**Figura 24: IDEALIZZAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DA SEYAMA E SATO (1998).** La linea tratteggiata rappresenta la *reflectance-map* ottenuta con una simulazione lambertiana, quella spessa il risultato dell'esperimento.

Le due curve differiscono significativamente e ciò dimostra che non è appropriato assumere che il sistema percettivo utilizzi una *reflectance-map* di tipo lambertiano. I dati che dimostrano una sottostima della profondità simulata sarebbero tutti interpretabili in tal senso.

Gli autori dimostrano che il paradigma sperimentale è corretto simulando gli stessi stimoli dell'esperimento precedente con la *reflectance-map* ottenuta per ogni soggetto. I risultati, infatti, evidenziano l'uguaglianza tra la stima di profondità e la simulazione.

## Capitolo 2 *Shape-from-other*

«La luce che colpisce gli occhi non è la stessa che colpisce la mente.»

Max Friedländer, “Von Kunst und Kennerschaft”.

In questo capitolo si vogliono affrontare alcuni aspetti dell’interazione degli oggetti con la luce che non rientrano nella definizione “classica” di *shape-from-shading* (che si basa sullo *shading* locale).

Le ricerche effettuate, spesso, sono fortemente limitate da modelli fotometrici locali e parziali (Forsyth e Zisserman, 1990, 1991), detti anche equazioni di irradianza dell’immagine (Horn, 1977b). Gli stimoli sono solo un’approssimazione delle scene reali. Non viene considerato, ad esempio, che i *patch* della superficie riflettano luce anche in altri punti della stessa (vedi il Paragrafo 2.2 e il Capitolo 3) o che possano proiettare delle ombre complicando notevolmente la funzione che determina la distribuzione delle radianze, data la geometria della scena. Nel lavoro di Forsyth e Zisserman (1991) si evince come questa componente possa produrre effetti notevoli nelle scene (vedi il capitolo Paragrafo 3.2 a p. 89). Inoltre, le immagini naturali contengono specularità generate dalle riflessioni delle superfici lucide. Nella letteratura non è raro trovare riferimenti a tali elementi dell’immagine indicandoli come confondenti nel recupero della struttura tridimensionale della scena. Tuttavia, alcuni Autori (ad esempio Blake e Bülthoff, 1991) hanno evidenziato la ricchezza delle informazioni geometriche estraibili mediante modelli matematici e forse anche dal sistema percettivo.

## Paragrafo 2.1    *Shadows*

«Don Juan pointed directly to a boulder in front of us. “Look at the shadow of that boulder,” he said. “The shadow is the boulder, and yet it isn’t. To observe the boulder in order to know what the boulder is, is doing, but to observe its shadow is not doing.”

Shadows are like doors, the doors of not-doing. You may say that there is movement in them, or you may say that the lines of the world are sown in them, or you may say that feelings come from them. »

**Carlos Castaneda, Don Juan.<sup>16</sup>**

Lo *shading* fornisce informazioni riguardo alla forma delle superfici, essendo determinato dal loro orientamento in relazione alla sorgente che le illumina. Una zona in ombra, invece, non riceve illuminazione diretta (Beck, 1972).

È la specifica forma e distribuzione dell’ombra che può fornire informazioni sull’organizzazione tridimensionale della scena. Gli Autori che hanno studiato questa componente delle immagini si dividono. Alcuni sostengono che esse possano aiutare il riconoscimento fornendo informazioni sull’illuminazione e sulla struttura tridimensionale, altri che esse introducano contorni spuri, che possano essere confusi con i bordi degli oggetti.

---

<sup>16</sup> Citazione riportata dal sito della Silicon Graphics (vedi siti Web).

---

### Sezione 2.1.1 Fisica e definizione delle ombre

Se i raggi luminosi che colpirebbero una superficie sono bloccati dalla presenza di un oggetto opaco, si registra la formazione di un'ombra. In particolare se tutti i raggi provenienti dalla sorgente sono occlusi, al fenomeno si dà il nome di ombra, mentre se ne sono occlusi solamente alcuni (l'illuminante non può essere puntiforme), esso è chiamato penombra. L'ombra ha due qualità che la definiscono: la forma e gli attributi. La forma dell'ombra è determinata congiuntamente da diversi fattori e descritta da regole geometrico-proiettive: le proprietà della sorgente luminosa, la forma dell'oggetto che genera l'ombra, la forma della superficie su cui essa giace e la posizione relativa dell'oggetto, dell'illuminante e della superficie ricevente. Anche gli altri attributi sono caratterizzati fisicamente (Cavanagh e Leclerc, 1989): la chiarezza deve diminuire nella zona in ombra, ci possono essere solo alcune variazioni di colore cromatico tra zona illuminata e non, non può esserci variazione di movimento e/o profondità relativa, il tipo e il contrasto delle *texture* devono rimanere costanti su ambo i lati.

Abbiamo già detto all'inizio dello scritto che le ombre sono classicamente definite (Arnheim, 1954, Baxandall, 1955) come portate e proprie. Tuttavia, in certi casi può essere utile fare una distinzione anche dei singoli bordi d'ombra (vedi Figura 25). Ciò risulta molto più utile nella ricerca sul riconoscimento delle aree in ombra.

- “*terminator contours*”, quando l'oggetto e l'ombra creata sono continui;
- “*cast contours*”, quando l'ombra di un oggetto cade su un'altra parte dello stesso oggetto;
- “*extremal contours*”, quando la superficie dell'oggetto è tangente alla linea dello sguardo dell'osservatore.



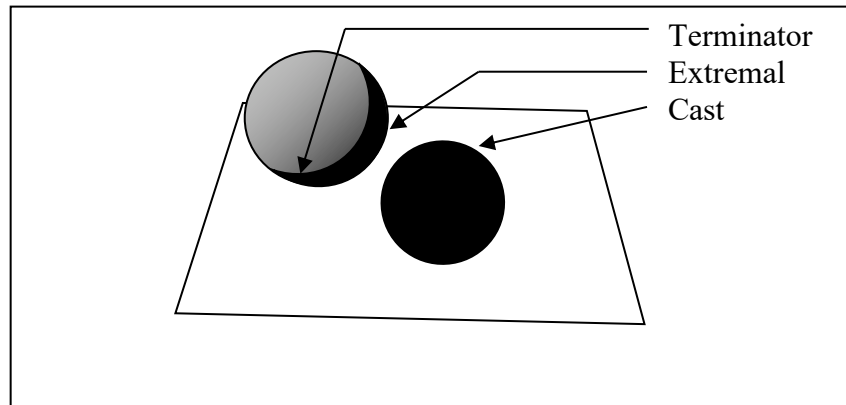


Figura 25: TIPI DI BORDI D'OMBRA.

Questa classificazione, tuttavia, non distingue le ombre secondo il contorno che le definisce: anche le *self-shadow* contengono un contorno di proiettato. Inoltre, i bordi delle ombre proiettate risultano netti solamente con luci puntiformi. Infatti, le sorgenti estese generano delle ombre con penombra (dette anche *soft-shadow* nella letteratura della *Computer Graphics*, vedi Capitolo 3). La dolcezza dell'ombra è evidente per i soli contorni della *cast-shadow* che non sono in contatto con l'oggetto che le genera.

### Sezione 2.1.2 Riconoscimento dell'ombra

Per usare le informazioni apportate dalle ombre è necessario risolvere due problemi: riconoscere quali aree dell'immagine sono ombre e determinare quale oggetto le determina. Infatti, i bordi presenti nello stimolo prossimale possono essere dovuti sia a differenze di illuminazione (bordi di illuminazione), che alla differente riflettanza di due zone adiacenti (bordi di riflettanza). La differenza tra i due sta nel fatto che il primo tipo non riflette direttamente le proprietà del mondo distale (vedi risorse Web). Il riconoscimento delle ombre implica la combinazione dell'analisi di *cue* a basso livello e dei meccanismi ad alto livello. Le teorie "*Image Based*" propongono che le rappresentazioni degli oggetti includano tutte le informazioni, quindi anche le ombre. Cavanagh e Leclerc (1989), invece,

propongono che avvenga una sorta di *matching* con una rappresentazione mnestica dell'oggetto e solo in seguito si procederebbe ad una distinzione dei bordi tra quelli d'ombra e non. Altre teorie (Marr e Nishihara, 1978) propongono che siano estratti gli invarianti dell'oggetto togliendo le caratteristiche spurie come le ombre. Moore e Cavanagh (1998), utilizzando immagini con un solo bit di profondità-colore, dimostrano che per identificare le ombre deve necessariamente esistere un processo *top-down*: nelle loro immagini sia i bordi d'ombra che quelli degli oggetti assumono la stessa conformazione, escludendo qualsiasi possibilità di analisi locale.

Braje, Legge e Kersten (2000), evidenziano come non vi sono variazioni nella prestazione di riconoscimento di oggetti naturali (frutta) con o senza ombre. Questo potrebbe essere dovuto alla presenza di un meccanismo per l'analisi veloce e preattentiva delle ombre, all'uso dell'informazione data dall'ombra per la sola distinzione di forme in categorie subordinate o al fatto che le ombre non fossero usate per il compito di riconoscimento. Ciò risulterebbe (anche secondo Tarr, Kersten e Bülthoff, 1998) dalla necessità di determinare correttamente l'oggetto che le ha prodotte. Tale fenomeno lascerebbe intuire che le ombre non vengono normalmente usate come fonte di informazione per determinare la forma degli oggetti, ma lo sarebbero solo nel caso che questa fosse l'unica informazione disponibile o che la forma in questione non fosse mai stata incontrata dal soggetto.

Il sistema percettivo, dati alcuni indizi sui fattori che generano un'ombra, potrebbe determinare gli altri utilizzandone la forma. Nella pratica ciò avviene soltanto raramente: è estremamente difficile stabilire quale oggetto produce una particolare ombra (il cosiddetto problema della corrispondenza dell'ombra), perciò il sistema percettivo deve possedere una qualche regola semplicistica per identificare localmente una zona d'ombra. Se questo meccanismo fallisce, i bordi di un'ombra vengono classificati come cambiamenti nel materiale che costituisce una superficie. Alcune volte, infatti, succede che un'interpretazione errata porti alla completa riorganizzazione tridimensionale di una scena (ciò avviene

soprattutto con figure poveramente definite spazialmente). Tuttavia, la forma delle ombre apporta alcune informazioni riguardanti l'oggetto che le determina, per questo vi sono dei casi in cui si può inferire la forma dell'oggetto che le crea (come accade ad esempio nei già citati quadri di Collins e G  r  me).

Cavanagh e Leclerc (1989) effettuano degli esperimenti per verificare quali sono gli attributi dell'ombra che la rendono tale per il sistema percettivo. Nonostante l'aggiunta di colori cromatici e di movimenti all'interno dell'ombra fisicamente impossibili, non appaiono variazioni nella percezione dei soggetti. Sembra che l'unico attributo importante sia la corretta polarit   della luminanza al bordo (anche se in altre ricerche    dimostrato che con ombre troppo chiare i soggetti riconoscono correttamente l'organizzazione tridimensionale della scena).    possibile che il sistema percettivo utilizzi due processi distinti per l'analisi dell'ombra: il primo si servirebbe degli operatori per la detezione della polarit   di chiarezza al bordo per estrarre la forma tridimensionale della scena, l'altro giudicherebbe l'accettabilit   dell'interpretazione di una zona come ombra. Ci   implicherebbe che, anche quando una zona non    interpretabile come un'ombra per ragioni di colori o tessitura, essa potrebbe avere comunque la chiarezza e la forma adatta alla percezione della tridimensionalit  . Anche Mamassian, Knill e Kersten (1998) sostengono che l'opacit   dell'ombra e la penombra aumenterebbero il realismo, ma non modificherebbero l'effetto sulla percezione tridimensionale.

Livingstone (1988) supporta queste osservazioni, affermando che il sistema neurale per l'analisi delle ombre proiettate non deve necessariamente essere insensibile al colore cromatico, ma non si serve di quest'analisi perch   l'unica caratteristica saliente delle zone d'ombra    la diversa chiarezza. Perci   questi *cue*, come tutti gli altri monoculari, sarebbero analizzati nel sistema parvo-interblob. Siccome esistono due flussi di analisi delle informazioni visive nella corteccia (Mamassian, Knill e Kersten; 1998), uno occipito-temporale, che analizza la forma degli oggetti, ed una occipito-parietale, che determina la loro posizione spaziale,

probabilmente le informazioni derivanti dalle *attached-shadow* sono analizzate nella prima e quelle delle *cast-shadow* nella seconda.

### **Sezione 2.1.3 Percezione e interpretazione delle ombre**

Colori, tessitura e forma delle ombre sono fisicamente determinati. Tuttavia, il sistema percettivo sembra ignorare questi vincoli, accettando anche situazioni innaturali (Cavanagh Leclerc, 1989). Pare, infatti, essere sufficiente che le ombre siano più scure delle zone illuminate e che ci sia una polarità consistente nel contrasto ai bordi perché esse siano percepite come tali.

Tarr, Kersten e Bülthoff (1998) rilevano un aumento dei tempi di reazione in un compito di *matching* tra oggetti quando viene modificata la direzione di illuminazione e sono presenti delle *cast-shadow*, in particolare quando gli oggetti risultano simili, e ancor di più se le ombre sono simulate con bianchezze maggiori delle aree circostanti. Senza *cast-shadow* non riscontrano tale diminuzione nella prestazione, ma con illuminazione fissa la performance non raggiunge il livello della situazione precedente.

#### **Profondità**

Arnheim (1954) afferma che le ombre proprie rivelano le articolazioni plastiche delle superfici e Beck (1972) indica che quelle presenti su di un asciugamano spiegazzato non sono viste come ombre, ma come grinze della stoffa, in quanto danno origine a sottostrutture fenomeniche dell'oggetto complessivo (vedi anche Sezione 1.1.3, Analisi delle feature). Infatti, Baxandall (1995) evidenzia che per la maggior parte delle persone le ombre sono solamente quelle portate. Queste ultime forniscono importanti informazioni per la definizione dell'assetto spaziale della scena in quanto l'insieme di tutte le ombre presenti nella scena costituisce un sistema coerente (Massironi, 1998). Tutte obbediscono alle condizioni di illuminazione. L'illuminante è una componente fenomenicamente unificante, non solo perché distingue le superfici, ma

anche perché riempie lo spazio, con un effetto definito “*air shadow*” (Beck, 1972).

Yonas, Goldsmith e Hallstrom (1978) dimostrano come la forma dell’ombra proiettata possa servire a inferire la forma dell’oggetto che la ha generata, nonché la sua altezza dal suolo. Mamassian, Knill e Kersten (1998) affermano che le ombre, in generale, hanno una forte influenza nel determinare le relazioni ordinali di profondità. Tarr, Kersten e Bülthoff (1988) dimostrano come le ombre possono migliorare la prestazione in un compito di riconoscimento di oggetti: per i tre studiosi esse apportano informazioni sulla forma o sulle condizioni di illuminazione. Berbaum, Bever e Chung (1984), invece, evidenziano come il giudizio del verso della convessità non è influenzato dall’inferenza della direzione di illuminazione consentita dall’ombra proiettata. Altri risultati, ad esempio quelli di Erens, Kappers e Koenderink (1993a) dimostrano che lo stesso compito da esiti migliori. Mingolla e Todd (1986) affermano che le ombre portate possono far apparire più obliqua la direzione di illuminazione e migliorare la percezione di profondità dovuta allo *shading*. Quest’effetto non sarebbe dovuto ad un’influenza sulla ricostruzione della forma di per sé, ma all’effetto che esse avrebbero sulla percezione della direzione di illuminazione.

### **Direzione di illuminazione**

Gli esperimenti di Kersten, Mamassian e Knill (1997) dimostrano come le informazioni date dalle *cast-shadow* sono più importanti di altri vincoli percettivi nella determinazione della percezione dei soggetti, compresa l’assunzione della costanza di grandezza dell’oggetto. I contorni intrinseci delle ombre apportano importanti informazioni relative alla direzione della sorgente luminosa ed alla forma della superficie su cui giacciono. I risultati di Knill, Mamassian e Kersten (1997) suggeriscono che tale indizio può essere direttamente utilizzato dal sistema percettivo per inferire l’inclinazione rispetto alla verticale (*tilt*) della provenienza della luce, la forma globale della superficie e la concavità/convessità, utilizzando le informazioni presenti su eventuali bordi netti. Essi dimostrano che i dati

ottenuti tramite sorgenti luminose puntiformi possono essere generalizzati per tutti i tipi di sorgenti estese di tipo convesso.

### **Movimento dell'ombra**

L'importanza dell'informazione apportata dal movimento dell'ombra portata di un oggetto è maggiore di altre considerevoli sorgenti (Mamassian, Knill e Kersten, 1998). Il fatto che l'ombra sia più scura delle regioni che la circondano risulta importante nel considerare tale regione come "ombra". Anche in condizioni innaturali, tuttavia, si può rilevare una certa quota di movimento apparente. Quando il movimento dell'ombra è causato dall'illuminante in movimento, il sistema percettivo interpreta la scena come illuminata da una sorgente stazionaria. Kersten, Mamassian e Knill (1997) considerano tali evidenze come l'incorporazione nel sistema percettivo del vincolo della sorgente stazionaria per l'analisi dell'organizzazione spaziale delle scene. Kersten, Knill, Mamassian e Bülthoff (1996), fanno notare come l'informazione sulla profondità dovuta al movimento delle ombre sia sempre stata ignorata nelle teorie della percezione, pur essendo un fatto noto sin dai tempi di Da Vinci che l'ombra determina un grande senso della tridimensionalità. Il movimento dell'ombra di un oggetto induce un movimento apparente tridimensionale (vedi risorse Web), anche quando l'oggetto è fermo. Mamassian, Knill e Kersten (1998), infatti suggeriscono che se proiettate su una superficie piana, le *cast-shadow* indurrebbero una percezione dell'organizzazione tridimensionale con un meccanismo analogo allo *structure-from-motion*.

Tuttavia, l'informazione data dal movimento dell'ombra è interpretabile dal sistema percettivo solamente se esso utilizza delle regole *a priori* (Mamassian, Knill e Kersten, 1998). Infatti, è necessario risolvere correttamente tre problemi: segmentare ed identificare le ombre (ciò risulta semplificato rispetto alla situazione statica, perché il movimento relativo dell'oggetto e dell'ombra deve seguire la linea che li connette alla fonte luminosa); identificare quale oggetto proietta quale ombra (la correlazione del movimento tra i due apporta un'informazione di facile interpretazione); combinare le informazioni presenti nella scena.

## **Paragrafo 2.2    Effetti non locali d'illuminazione**

«E per questo io propongo nella prima proposizione dell'ombra [...] come ogni corpo opaco fia circondato e superficialmente vestito d'ombre e di lumi [...] esse ombre sono in sé di varie qualità d'oscurità, perché da varie quantità di razzi luminosi abbandonate sono [...] E perché la percussione della derivativa ombra è sempre circondata da percussione di luminosi razzi, la quale per riflesso concorso risaltando indietro verso la sua cagione trova l'ombra originale e si mischia e si converte in quella alquanto variandola di sua natura»

**Leonardo Da Vinci, in Richter (1953), Vol. 1 Num. 111.**

Leonardo Da Vinci, in molti dei suoi *Appunti*, descrisse i fenomeni di interazione tra la luce e gli oggetti, fenomeni che oggi sono detti “*illuminazione passiva*”. I pochi lavori sulla psicofisica dell'illuminazione indiretta sono stati incentrati sulla percezione della riflettanza (Gilchrist e Jacobsen, 1984) e sull'analisi dell'informazione per la determinazione della forma (Forsyth Zisserman, 1991).

Uno dei problemi di interpretazione dell'immagine della *Computer Vision* (che fornisce il contributo interpretativo maggiore del meccanismo dello *shape-from-shading*) è la natura non locale dell'interazione luce-oggetto. La difficoltà risiede nel fatto che gli oggetti non risultano illuminati da una sola sorgente luminosa e per questo l'analisi mediante la *reflectance-map* fallisce completamente (vedi Paragrafo 1.1).

L'analisi dello *shading* da parte del sistema percettivo e degli algoritmi di *shape-from-shading*, diventa molto più complessa quando nella

scena sono presenti più superfici, in quanto la quantità di luce riflessa viene influenzata dalla presenza delle altre per diverse ragioni:

- Uno degli effetti più ovvi delle interazioni è la presenza di *cast-shadow* di cui si è parlato nel Paragrafo 2.1.
- Un secondo fenomeno si verifica con superfici trasparenti, in quanto esse riflettono solo una parte dei raggi incidenti, mentre gli altri vengono trasmessi verso eventuali altri oggetti.
- Anche nel caso di illuminazione indiretta si verificano interazioni tra le superfici: quando una superficie viene illuminata, la luce da essa riflessa può raggiungere altri oggetti presenti nella scena con effetti equivalenti a quelli delle sorgenti luminose propriamente dette (non a caso si parla di illuminazioni passive). Se le *cast-shadow* possono avere dei bordi netti con illuminazioni puntiformi, per quanto riguarda le autoriflessioni, invece, i pattern di illuminazione sono sempre “soft” e a bassa frequenza spaziale, qualsiasi sia la natura dell’illuminazione, e non sono mai determinati direttamente dalla direzione dell’illuminazione.
- Un caso particolare di illuminazione indiretta è l’illuminazione ambientale (vedi anche Paragrafo 2.4): in un ambiente circondato da pareti, i raggi luminosi di una sorgente rimbalzano casualmente in tutte le direzioni, determinando una certa quota di illuminamento per ogni punto delle superfici.
- Un altro effetto non locale della luce, detto *diffuse-shadow* (Thompson, Shirley, Smits, Kersten, Madison, 1998, 1999<sup>17</sup>), è dovuto al fatto che una superficie possa bloccare una certa porzione dell’angolo solido di vista di un punto senza per questo bloccare la luce diretta. Ciò provoca una diminuzione della porzione di luce ambientale incidente sul punto, con un effetto matematicamente simile alle autoriflessione, ma percettivamente simile a una penombra. L’effetto

---

<sup>17</sup> Vedi anche risorse Web.

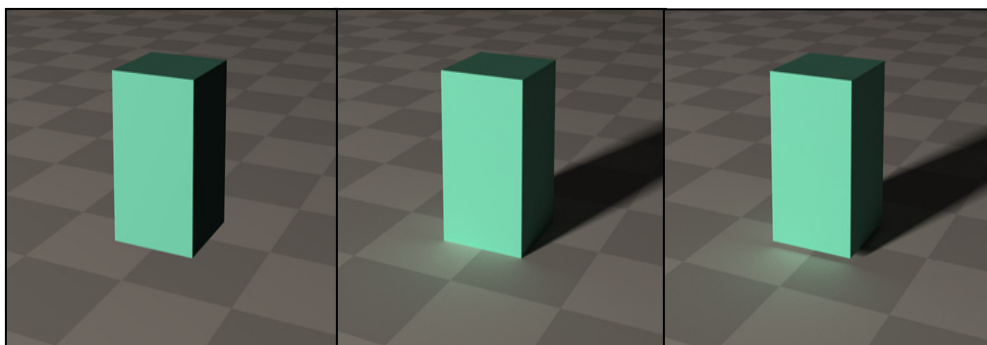


dell'illuminazione secondaria, quindi, si mescolerebbe con quello delle ombre.

Horn (1970) ha dimostrato matematicamente che in assenza di effetti non locali un angolo triedico può essere determinato da una struttura spaziale ambigua. Egli rivela che la configurazione implicata può essere sia concava che convessa. Se, invece, la distribuzione di luminanze di un triedro cavo viene vincolata anche da autoriflessioni, la forma poliedrica risulta univocamente determinata.

Thompson, Shirley Smits e Madison (1998, 1999), dimostrano come gli effetti dell'*equazione di radiosity* (l'equazione che serve per calcolare la luminanza dell'immagine considerando l'illuminazione secondaria) siano percettivamente importanti nella determinazione del contatto tra due oggetti (vedi Figura 26). La presenza di ombre proiettate e illuminazione secondaria lungo tutto il perimetro conferisce alla scena una certa consistenza spaziale rendendo più evidente la posizione tridimensionale del cubo e la vicinanza al piano (nelle risorse Web si può avere lo stesso percepito anche se questi due *cue* sono approssimati grossolanamente tanto da non sembrare realistici).

Weinshall (1994) Ha affermato che l'illuminazione indiretta può degradare notevolmente l'accuratezza della ricostruzione della forma degli algoritmi di *shape-from-shading*, ma potrebbe essere utilizzata dai soggetti per determinare altri *cue* di forma.



**Figura 26: LO STESSO PARALLELEPIPEDO SIMULATO IN MANIERA DIVERSA. Senza *radiosity* ed ombre, in contatto con la superficie e staccato dalla superficie. Thompson 1998.**

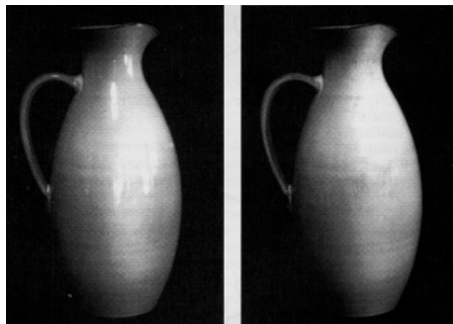
## **Paragrafo 2.3    *Superfici lucide***

«I fattori che rinforzano l'impressione di rigidità rinforzano pure quella di profondità.»

**Farnè M., 1972, “La tendenza alla terza dimensione”, *Le scienze*, N. 62**

Marr (1982) ha evidenziato come il sistema visivo utilizzi i vincoli fisici nel determinare la percezione dovuta ad una determinata stimolazione e come ciò avvenga, parzialmente, anche per le specularità.

Koenderink e van Doorn (1980) hanno dimostrato che il crearsi, il movimento e lo sparire delle specularità dovute allo spostamento dell'osservatore sono indizi importanti nella determinazione della geometria delle superfici. Tuttavia, si potrebbe obiettare che la specularità è un fenomeno marginale, forse dovuto all'estensione del meccanismo di parallasse. Beck, invece, con una semplice fotografia dimostra come i riflessi presenti su un vaso, anche se localmente delimitati, esercitino un'influenza saliente sull'apparenza di tutto il vaso.



**Figura 27: Fotografia di un vaso a cui sono stati tolti gli *highlight*. Beck, 1972.**

### Sezione 2.3.1 Fisica e descrizione

I principi per la descrizione del movimento dei riflessi deriva dalla ottica dei raggi macroscopica e dalla geometria differenziale. Lo spostamento relativo oggetto-osservatore genera un movimento apparente delle specularità. Il sistema è di tipo lineare: esiste una relazione di dipendenza geometrica tra la velocità di movimento osservatore/oggetto e quella presente nell'immagine. I coefficienti moltiplicativi del sistema lineare dipendono dalla configurazione geometrica di osservazione e di illuminazione, dall'orientamento della superficie, dalla curvatura dell'oggetto e dalla sua profondità; inoltre non rimangono costanti nel tempo.

Blake e Bülthoff (1991) analizzano una sfera per poter descrivere il movimento dell'*highlight*. Ne riporto i punti salienti. La posizione di un riflesso  $t$  su una sfera di raggio  $a$ , cambia in relazione ad un punto fisso sulla sfera al variare della posizione dell'osservatore di una quantità  $\Delta t$  che risulta dipendente dalla velocità dell'osservatore  $V$  perpendicolare alla distanza  $\lambda$  che lo separa dalla sfera secondo la funzione:

$$-V = 2 \frac{\lambda^2}{a} \Delta t$$

$\Delta t$  varia a seconda dei parametri: diminuisce con funzione quadratica per l'aumento di  $\lambda$ , aumenta linearmente con  $V$  ed  $a$  (tanto che con sfere piccole l'*highlight* si può considerare fermo e con  $a \rightarrow \infty$  segue l'osservatore in modo simile al riflesso della luna su un lago).

Il fatto che la posizione dell'*highlight* sia dipendente dalla posizione di osservazione implica che essa non coincida nei due occhi. Ciò provvede un utile informazione per la percezione stereoscopica della forma (Blake e Bülthoff, 1990;1991), ma determina una certa difficoltà teorica nella comprensione del processo di *matching* stereoscopico perché la posizione dell'*highlight* è diversa (Todd, Norman, Koenderink e Kappers, 1997)<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> Vedi Sezione 1.1.3.

### **Sezione 2.3.2 Percezione della forma dagli *highlight***

Spesso le scene contengono molti punti di *highlight* dovuti alla riflessione speculare della luce sulle superfici lucide. In letteratura si trovano svariati riferimenti a queste componenti dell'immagine. Il loro ruolo è identificato nell'essere un elemento di confusione nella percezione della struttura della scena rappresentata (Mingolla e Todd, 1986). Blake e Bülthoff (1990), invece, dimostrano come esse possano anche rivelarsi ricche sorgenti di informazione geometrica locale, tanto da stabilizzare la percezione di figure ambigue concave/convexe. L'apparenza dell'*highlight* può, inoltre, modificare la percezione della lucidità delle superfici (vedi anche Figura 27). Gli autori propongono che il sistema percettivo incorpori un modello per la descrizione ed il riconoscimento di queste *feature*, basato sulle leggi dell'ottica a raggi e della geometria differenziale. Essi suggeriscono che la sorgente luminosa "virtuale" percepita dall'osservatore viene localizzata dietro alle superfici convexe e generalmente davanti a quelle concave secondo l'interpretazione data dal sistema percettivo alla disparità binoculare. Il fatto che tale disparità sia necessariamente determinata dalla direzione di curvatura fa supporre che nell'interpretazione il sistema percettivo utilizzi una regola stabile basata sulle leggi fisiche della riflessione speculare. Questa idea non è certo nuova: Marr (1982) suggerisce che il sistema percettivo sfrutti le leggi fisiche e Shepard (1984) afferma che i vincoli fisici guidino molti processi mentali (compresa la percezione), in quanto internalizzati mediante l'estrazione delle regolarità del mondo. Proprio partendo da questa idea Koenderink e van Doorn (1980) descrivono l'importanza della direzione e ampiezza del movimento degli *highlight* su linee paraboliche come indizi per la determinazione della geometria della superficie osservata, ed in particolare per figure reversibili. Anche Blake e Bülthoff (1991) dimostrano come il segno della disparità binoculare di un *highlight* sia un *cue* robusto, capace di eliminare l'ambiguità concavo/convesso, senza necessariamente conoscere la posizione dell'illuminante. Questo lo si poteva arguire già dal lavoro di Zisserman, Giblin e Blake (1989), i quali

hanno dimostrato come dagli spostamenti dell'osservatore sia possibile determinare la posizione della sorgente luminosa.

Blake e Bülthoff (1991), inoltre, suggeriscono come anche la forma monoculare delle specularità sia una fonte di informazione sulla forma della superficie. Essi paragonano la capacità dell'indizio stereovisivo a quella data dal movimento degli *highlight* per la riduzione dei gradi di libertà della curvatura in un punto, in modo che, fondendo tale informazione al *cue* monoculare, il sistema percettivo può, potenzialmente, determinare la geometria della scena. Anche i casi in cui i dati non confermano l'ipotesi risulterebbero spiegabili: gli errori con superfici concave sarebbero determinati dalla mancanza di un modello di illuminazione a luce estesa e dall'illuminazione passiva (vedi Paragrafo 2.2 e Paragrafo 2.4).

Al contrario, Todd e Mingolla (1983) asseriscono che la lucidità della superficie migliora la percezione della curvatura, ma non influisca sulla percezione della direzione dell'illuminante.

## **Paragrafo 2.4    Tipi di sorgente luminosa**

«... il sistema visivo organizza le immagini retiniche ambigue sulla base di regole di inferenza che sfruttano talune regolarità presenti nel mondo esterno.»

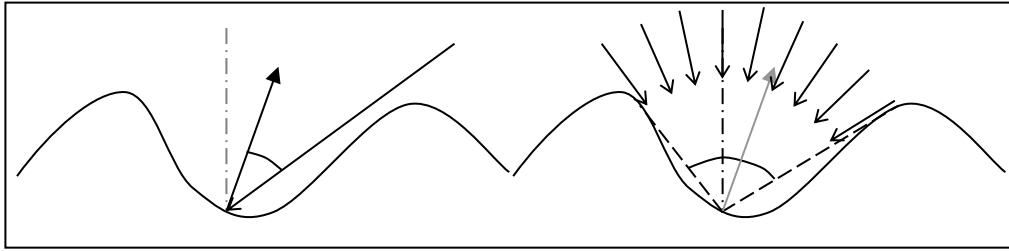
Hoffman D.D., 1984, “L’interpretazione delle illusioni visive”, *Le scienze*, V. 186

La percezione degli oggetti cambia ampiamente in funzione di minime variazioni del profilo di luminanza delle immagini. Uno degli aspetti dell’organizzazione della scena che influisce sulla distribuzione delle luminanze è il modo in cui la luce viene emanata dalla sorgente.

Il sistema visivo ha bisogno di prendere in considerazione il tipo di illuminazione per poter sfruttare e interpretare i *cue* dello *shading* e delle ombre. È importante, quindi, riuscire a distinguere le sorgenti luminose secondo le proprietà di emissione per poterle in seguito distinguere e confrontare anche da un punto di vista teorico.

### **Sezione 2.4.1    Illuminazione puntiforme e diffusa**

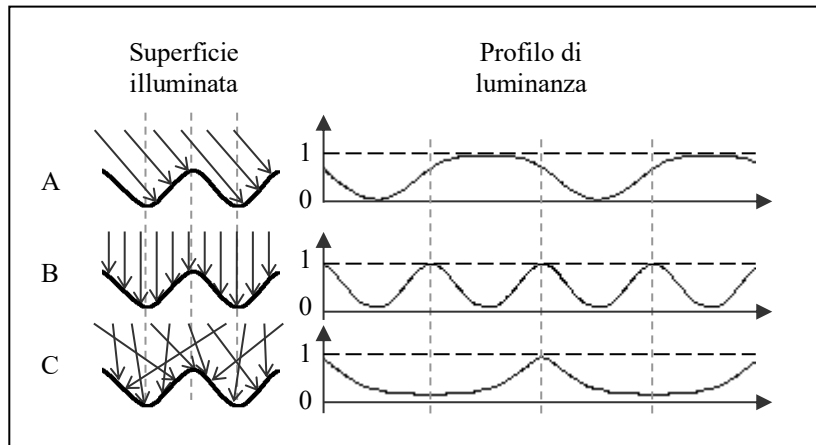
Per illuminazioni puntiformi a distanza infinita la variabile critica per la determinazione del profilo di luminanza è l’angolo di incidenza sulla superficie, mentre per le illuminazioni diffuse il fattore determinante è l’angolo di “*acceptance*”<sup>N</sup> oltre il quale l’illuminazione verrebbe bloccata e non raggiungerebbe la superficie (rappresentato nella seguente Figura 28).



**Figura 28:** ANGOLO DI INCIDENZA E *ACCEPTANCE ANGLE*.

Nella Figura 29 sono rappresentati gli angoli di incidenza dei raggi luminosi delle tre condizioni di illuminazione.

- A) La prima funzione risulta avere valore 0 nei punti in cui i raggi risultano tangenti alla superficie. Ha valore 1 se e solo se l'ampiezza della sinusoide è tale per cui i fianchi delle valli sottendono un angolo retto; in tal caso la funzione è una perfetta sinusoide; è sfasata rispetto alla superficie nella direzione di provenienza della luce. Il profilo ha la stessa frequenza spaziale della superficie, ma è distorta e sfasata;
- B) La seconda funzione risulta avere un pattern asimmetrico con frequenza raddoppiata. La direzione di illuminazione causa una grande differenza nell'andamento del profilo rispetto ad A. Ciò evidenzia le diverse interpretazioni possibili a seconda dell'assunzione sulla direzione di illuminazione;
- C) La terza funzione rappresenta l'angolo di *acceptance*, somma degli angoli sottesi tra la perpendicolare globale alla superficie e le tangenti a destra e a sinistra della superficie stessa.



**Figura 29: PROFILI DI LUMINANZA PRODOTTI DA UNA SUPERFICIE SINUSOIDALE ILLUMINATA IN TRE MODI DIVERSI.**

**A) illuminazione obliqua con direzione tangente alla sporgenza di sinistra.**

**B) illuminazione puntiforme di fronte alla superficie.**

**C) illuminazione diffusa.**

### Sezione 2.4.2 Psicofisica

Tyler (1998) propone che il sistema percettivo non sia in grado di utilizzare degli stimoli generati mediante illuminazioni puntiformi. L'interpretazione dell'immagine non è coerente con l'assunzione di default del sistema percettivo di un illuminante unidirezionale (proposta come semplificazione della *Computer Vision*, Paragrafo 1.1), ma implica un'*illuminazione diffusa*.

Langer e Bülthoff (1999) sostengono che i pattern di ombreggiatura risultano percettivamente ambigui perché con illuminazione puntiforme una superficie illuminata da un punto determina la stessa immagine retinica che si otterrebbe con una superficie con profondità invertita ed illuminata dal verso opposto.

L'assunzione sulla non puntiformità della sorgente risulta generale per tutte le condizioni che non specificano degli indizi contrari (ad es. Ramachandran, 1988abc). Data l'assunzione di default, l'interpretazione di profondità è consistente con l'ipotesi che il sistema percettivo usi il profilo



di luminanza compresso come indicazione della forma percepita. Ciò permetterebbe una computazione veloce e non ricorsiva (senza cioè determinare la quantità della compressione e la funzione dell'angolo di *acceptance*).

Langer e Bülthoff (1999) usano un modello di illuminazione con un semicilindro con asse che passa per il punto considerato nell'analisi. L'intensità dell'immagine in ogni punto è pari a

$$I(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{\theta(x, y)} N(x, y) \cdot L d\Omega$$

I risultati sperimentali da loro ottenuti indicano che, a differenza delle condizioni di illuminazione puntiforme nelle quali i soggetti ottengono prestazioni buone soltanto con illuminazione dall'alto, nelle condizioni di illuminazione diffusa le risposte dei soggetti in un compito di determinazione della profondità relativa risultano essere molto buone. I dati sono coerenti con l'euristica proposta nell'ambito della pittura (Nicolaidis, 1941) per la quale le zone distanti devono essere rappresentate con aree scure (vedi anche Figura 19, p. 38). Il fenomeno mediante il quale l'interpretazione delle zone scure risulta in un senso di distanza è conosciuto sin dai tempi di Leonardo da Vinci, il quale afferma che tra due oggetti di uguale dimensione e forma, il più chiaro appare più vicino a chi lo osserva. Nella letteratura psicologica è stato formalmente dimostrato da Doshier, Sperling e Wurst (1986) che questa regola influisce sulla percezione di disegni *line-drawing* che sia utilizzata come assunzione di default nell'interpretazione dello *shading* dovuto ad illuminazione diffusa (Langer e Zucker, 1994; Tyler, 1998). Tuttavia, alla Sezione 1.2.1 abbiamo visto come la quantità assoluta di contrasto influisca sulla percezione di profondità.

## Paragrafo 2.5 Contorni

I risultati ottenuti da Mamassian e Kersten (1996) e le osservazioni di Koenderink e van Doorn (1982) fanno supporre un'ingente influenza del contorno dell'oggetto sulla percezione della forma. Anche se nella parte sperimentale di questo lavoro non vengono considerati tali componenti dell'immagine, un'adeguata specificazione potrebbe servire a comprendere meglio i dati sperimentali della letteratura.

Lo *shading* potrebbe essere utilizzato come *cue* indipendente per il recupero della forma, oppure potrebbe essere usato come indizio supplementare per l'interpolazione delle *feature* di forma, la cui profondità è data da altre sorgenti informative come i bordi. I *cue* di forma si possono suddividere in *surface-based*, come i gradienti di *shading* e *texture*, e *edge-based*, derivati dai contorni dell'oggetto. I primi apporterebbero soltanto un minimo vantaggio alla percezione delle superfici, mentre i contorni, i margini nell'immagine determinati dalla proiezione tridimensionale, sembrano essere molto informativi. Ve ne sono di due tipi: *discontinuity-boundaries*, presenti sui terminatori delle superfici *smooth* e alle intersezioni,) ed *external-boundaries*, occlusioni che si riscontrano nella transizione tra porzione visibile e non delle superfici.

I bordi estremi sono visivamente salienti perché obbligano l'interpretazione locale dell'attitudine della superficie. Mamassian e Kersten (1996) rilevano un'identica tendenza della sottostima dello *slant* percepito dai soggetti cui fosse presentata un oggetto con e senza *shading*, ma di un'ampiezza diversa. Essi affermano che i giudizi dei soggetti sono influenzati maggiormente dai bordi piuttosto che dallo *shading*. Lo stesso risultato è stato ottenuto da Johnston e Passmore (1994c), i quali

riscontrano la stessa prestazione in un compito di allineamento geodetico con lo *shading* e senza.

Koenderink e van Doorn (1982) evidenziano come ci sia forte corrispondenza tra la forma dei bordi e quella della superficie: se convessi, corrispondono ad una superficie localmente ellittica e se concavi, ad una iperbolica. Inoltre, affermano che le linee paraboliche hanno una importanza percettiva notevole, in quanto dividono le aree ellittiche da quelle paraboliche. Anche secondo Barrow e Tenenbaum (1981) il contorno è un aspetto decisivo per la ricostruzione della struttura tridimensionale. I bordi sono efficaci perché delimitano le diverse parti di un oggetto complesso e le differenti componenti di una scena. Inoltre forniscono un'informazione costante anche al variare dell'illuminazione.

Christou, Koenderink e van Doorn (1996) raccolgono dei dati in cui la percezione della forma, codificata nei termini di *slant* e *tilt*, ha una forte correlazione tra stimoli con *shading* e *line-draw*, ma scarsa tra *shading* e *texture*. Tale risultato conferma il fatto che la percezione sia maggiormente determinata dalle informazioni dei contorni. Johnston e Passmore (1994ab) evidenziano che la sottostima dello *slant* con stimoli definiti da *shading* risulta inferiore per i punti paralleli al piano immagine e per quelli ai bordi. Tuttavia le zone ai bordi non sono percepite come parallele alla linea dello sguardo (vedi anche Reichel e Todd, 1990; De Haan, Erens e Noest, 1995), perciò il miglioramento delle prestazioni dei soggetti (ad esempio Christou e Koenderink, 1997) non è da imputarsi ad un miglioramento dell'analisi delle informazioni dovute allo *shading*, ma forse, come suggeriscono anche Mingolla e Todd (1986), al fatto che il bordo separi le porzioni di campo visivo occupate dagli oggetti e ne permetta la determinazione dell'orientamento.

Christou e Koenderink (1997) hanno trovato dei dati che evidenziano come il *bias* sistematico nella direzione dell'illuminante sia reso meno forte dalla presenza dei contorni dell'oggetto.

## **Paragrafo 2.6    Movimento**

« Anche se l'occhio umano non possiede un otturatore, il mondo non ci appare confuso, perché il sistema visivo non funziona come una macchina fotografica, ma come un calcolatore programmato secondo regole matematiche precise. »

**Johansson G., 1975, “La percezione visiva del movimento”, Le scienze V 86**

Nell'interazione che abbiamo ogni giorno con l'ambiente che ci circonda le informazioni sulla struttura tridimensionale degli oggetti non sono date soltanto dagli indizi di profondità presenti nelle immagini statiche. La sistematica trasformazione della stimolazione prossimale è di grande importanza per il sistema visivo per la percezione della profondità e della forma.

In una sequenza di immagini in cui un oggetto definito solamente mediante lo *shading* è possibile identificare diverse condizioni per le quali il pattern osservato cambia:

- Movimento dell'osservatore rispetto ad una superficie opaca ed una sorgente di illuminazione stazionarie (parallasse di movimento) se l'oggetto ha una funzione di riflessione puramente lambertiana: le isofote rimangono stazionarie, come se il chiaroscuro fosse dipinto sulle superfici. Il flusso ottico è identico a quello determinato da elementi tissurali e può essere analizzato mediante i tradizionali modelli di *structure-from-motion* (ad esempio Horn e Shunk, 1981; Nagel, 1981).
- Movimento dell'osservatore rispetto ad una superficie lucida ed una sorgente di illuminazione stazionarie (parallasse di

movimento): il movimento delle componenti speculari risulta molto complesso. Gli highlight, infatti, si muovono molto rapidamente nelle zone piane dell'oggetto e rimangono quasi stazionari nelle regioni ad elevata curvatura (vedi Paragrafo 2.3).

- Movimento dell'oggetto rispetto alla sorgente luminosa: le isofote si spostano “scivolando” sulla superficie e generano una deformazione del pattern di *shading* (Norman, Todd e Phillips, 1995).
- Movimento della sorgente luminosa con osservatore e oggetto statici: induce una variazione delle intensità luminose riflessa da ogni punto della superficie.
- Movimento dell'oggetto e della sorgente luminosa.

### **Corrispondenza**

Il movimento genera due classi di deformazioni nelle immagini che Pentland (1991) definisce effetti fotometrici del movimento, riferiti alla variazione delle intensità dell'immagine, e agli effetti geometrici del movimento, ossia la variazione della proiezione geometrica. Questa classificazione è congruente alle due classi di problemi che bisogna affrontare nell'analisi teorica della percezione del movimento (che sono gli stessi problemi teorici dell'analisi della disparità binoculare):

- La prima riguarda la trasformazione di parti dell'oggetto per le quali è possibile stabilire una corrispondenza nella sequenza di immagini. Il “*matching delle feature*” è una condizione necessaria per la maggioranza dei modelli formali di determinazione della forma dal movimento. Se la deformazione dei contorni occlusivi e dell'ombreggiatura non contengono punti di discontinuità, le analisi condotte con questi metodi non portano ad una interpretazione di movimento rigido (delle eccezioni sono Blake e Bülthoff 1990,1991; Koenderink e van Doorn, 1980; Pentland, 1991).
- La seconda è relativa alle trasformazioni che non soddisfano questa condizione, come i contorni occludenti e i gradienti di *shading* senza discontinuità. Ci sono solamente alcune osservazioni sull'effetto cinetico di profondità dovuto a oggetti ombreggiati senza *feature*

identificabili (Koenderink, Kappers, Todd, Norman e Phillips, 1996; Todd 1985; Norman, Todd e Phillips, 1995), che assieme a quelli sull'esplorazione del *matching* stereoscopico nella stessa condizione (ad esempio Blake e Bülthoff, 1991) inducono a pensare che il concetto di “movimento” e di “disparità binoculare” debbano essere visti in maniera più generale e meno restrittiva (Norman, Todd e Phillips, 1995).

Koenderink e van Doorn (1980) propongono un'analisi della deformazione degli *highlight* e dello *shading* considerando i punti a sella. Durante una sequenza di immagini in cui l'oggetto si muove, i punti a sella si spostano lungo le linee paraboliche che separano le aree con curvatura di segno opposto.

### **Ricerche**

Pentland (1991) afferma che sia nella pratica che nella teoria dell'analisi del movimento, la variazione dell'intensità della luce riflessa dagli oggetti viene considerata come rumore di fondo, perché l'effetto prevalente è la deformazione geometrica. Egli dimostra invece che la deformazione del pattern di luminanze determinato dalla rotazione di una superficie senza bordi visibili induce una percezione di movimento rigido che non è stata riscontrata se era presente solo la texture. Il ricercatore sostiene che l'effetto fotometrico del movimento sia un *cue* più importante dell'effetto geometrico nella determinazione della forma percepita.

Norman, Todd e Phillips (1996) dimostrano che la stima dell'orientamento migliora nel caso l'oggetto simulato mediante ombreggiatura e bordi sia in movimento rispetto all'osservatore e alla sorgente di luce. L'errore della stima, infatti passa da 24.5° a 14.5° se lo stimolo è in rotazione ed è presente anche l'informazione stereoscopica. Questo risultato è interessante perché la stimolazione non presenta punti identificabili (è del tutto *smooth*) ed è presente l'informazione dovuta alla deformazione dei bordi esterni dell'oggetto (vedi Norman e Todd, 1994). Il coefficiente di correlazione tra il tilt simulato e quello riportato dai soggetti tende all'unità e spiega il 95% della varianza quando lo stimolo è in movimento e l'85% con stimolo statico. Il giudizio di *slant* è meno preciso, con  $r^2$  attorno a 0.5. Il movimento dell'oggetto, quindi, migliora la

performance dei soggetti tanto che i risultati ottenuti sono comparabili con quelli delle superfici definite da texture.

Anche Koenderink, Kappers, Todd, Norman e Phillips (1996) sottopongono i soggetti ad una stimolazione stereoscopica generata mediante il movimento dell'oggetto. I ricercatori evidenziano una coerenza delle risposte rilevate mediante una *gauge-figure* per l'orientamento locale ed un aggiustamento della distanza di un punto per la valutazione locale della profondità. Essi registrano una deviazione standard del giudizio di profondità di soli 2-4mm e del tilt di 25°.

I risultati ottenuti da Erens, Kappers e Koenderink (1993a) sull'abilità di categorizzazione della forma dimostrano come sia estremamente difficile determinare la forma di un oggetto quando sia totalmente sconosciuta la direzione dell'illuminazione. Se quest'ultima informazione viene resa evidente dalla presenza di una *cast-shadow* e mediante illuminazioni con direzioni diverse presentate con una sequenza ordinata, l'osservatore può determinare la curvatura della superficie avendo a disposizione diverse distribuzioni dei valori di luminanza dello stesso oggetto.

Domini e Caudek (1996), invece, dimostrano che la rotazione della superficie e della sorgente luminosa provoca una deformazione del pattern dell'ombreggiatura che non viene interpretata correttamente dal sistema percettivo. Nell'esperimento condotto dagli autori, infatti, la rotazione della superficie è stata giudicata correttamente solo nel caso in cui la sorgente di illuminazione fosse statica. Altrimenti, le risposte dei soggetti erano affette da un *bias* sistematico nella direzione di rotazione della sorgente luminosa.

### **Modelli computazionali**

Potenzialmente, la diversa direzione di illuminazione in immagini successive di uno stesso oggetto (Woodham, 1978) permette di determinare un unico punto nel *gradient-space* mediante l'intersezione di più linee nella *reflectance-map* come già evidenziato nella Sezione 1.1.1. Tuttavia, in questo caso l'informazione disponibile non è un set di immagini separate, ma una sequenza ordinata.

Deshpande e Chaudhuri (1999) hanno considerato il problema della stima del movimento uniforme di una sorgente luminosa che illumina un oggetto statico rispetto all'osservatore. Il cambiamento del pattern sul piano immagine nel tempo (*flow-field*) serve a recuperare i parametri del movimento. Questo problema, sostengono gli autori, risulta diverso dalla stima del movimento di un oggetto, in quanto non c'è nessun problema di corrispondenza tra le informazioni di due istanti diversi. La soluzione proposta è ottenuta in maniera ricorsiva con una stima dei minimi quadrati, applicando ai frame un filtro Kalman esteso. Tuttavia, all'inizio della computazione, deve essere applicato uno dei metodi già trattati per stimare la forma della superficie ed il punto di osservazione. I punti considerati nell'analisi devono essere visibili in due frame successivi (non devono stare in una zona d'ombra).

Anche Yamada, Saito e Ozawa (2000) utilizzano delle sequenze di immagini in cui l'illuminazione non risulta stazionaria, ma il loro scopo è quello di ricostruire la forma di una superficie (la pelle di un essere umano). Essi, prima determinano una stima con riflessione lambertiana ed in seguito eliminano i punti che determinano errori nella ricostruzione. Questo permette di eliminare, dicono gli autori, tutti gli effetti complessi dell'illuminazione come le ombre, le riflessioni speculari e l'illuminazione passiva.



## Capitolo 3 Computer Graphics

L'obiettivo della *Computer Graphics* è la determinazione dell'intensità d'immagine di una proiezione di una scena, data la geometria della stessa e le proprietà di riflessione. Tuttavia, diversamente dal processo fotografico con il quale condivide lo scopo, la creazione di immagini computerizzate è basata su algoritmi e modelli matematici. Un'adeguata trattazione di questi argomenti, quindi, risulta necessaria per permettere la ripetizione delle condizioni sperimentali.

Nella grafica computerizzata, tutte le immagini vengono scomposte in elementi, detti *pixel*, tramite una griglia rettangolare, e per ognuno di essi si opera un'analisi dedicata. Infatti, il valore di luminosità assegnato viene memorizzato nella porzione di memoria detta *Video Frame Buffer* e, tramite un convertitore D/A, convertito in segnale video. Tuttavia, per la determinazione della luminanza da ottenere per ogni pixel è necessario eseguire una serie di passaggi che, dalla definizione della struttura, diano come risultato tale valore.

Data una qualche definizione di una scena tridimensionale, il *rendering* è il processo mediante il quale è possibile ottenere delle immagini (*bitmap*). È come poter fotografare una scena che è definita soltanto da dimensioni tridimensionali. Per ottenere un'immagine è quindi necessario definire, oltre che l'organizzazione spaziale, un osservatore (il termine tecnico è *camera* dall'inglese “macchina fotografica”) in un determinato punto e con una certa direzione dello sguardo. Un'animazione è una serie di immagini renderizzate, ottenute mediante il processo di *keyframing* che, dati i valori iniziali e finali dei parametri, determina quelli intermedi in ogni momento della sequenza.

---

## Modelli

Il cosiddetto “*modello*” in grafica tridimensionale è un file contenente le informazioni necessarie a definire la scena ed è suddiviso in una parte geometrica, che descrive la forma degli oggetti (scomposti in punti e poligoni), ed una di *shading*, che contiene gli attributi delle superfici (vedi siti Web). Spesso vengono utilizzati dei tipi di modellazione solida molto semplici:

- forme predefinite nei programmi di grafica vettoriale (includono oggetti come sfere, poliedri, coni, eccetera);
- “spline”, superfici determinate matematicamente attorno al baricentro;
- mediante *depth-map*, utilizzando formule del tipo  $z = f(x, y)$ <sup>19</sup>.

Il *modello di illuminazione* esprime i fattori che determinano il colore delle superfici. Il *surfacing* è il processo di assegnazione dei valori che controllano l’interazione delle superfici con la luce (ossia il colore dell’oggetto, la componente speculare, la funzione di riflettanza, la trasparenza e le rifrazioni). Il *modello di shading* determina quando il modello di illuminazione locale viene applicato e gli argomenti che esso riceve. Ne esistono di diversi, ognuno dei quali ha pregi e difetti per cui spesso sono utilizzati in combinazione:

- *Costante*: viene computato un solo valore di illuminazione e di colore per l’intero oggetto. Dato che non ci sono variazioni nell’intensità dell’immagine non è un vero e proprio modello di *shading*, ma viene comunque utilizzato assieme agli altri per la determinazione del colore oggettuale.
- *Flat* o *Faceted*: tutti i pixel contenuti in un poligono hanno lo stesso colore, quindi ogni poligono risulta distinguibile. L’*anti-aliasing (oversampling)* è il metodo mediante il quale è possibile ridurre l’effetto “a scalino”, dovuto al contrasto tra due poligoni. Evita o riduce le bande di Mach, anche se originariamente era stato pensato per eliminare la segmentazione delle linee oblique.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> Negli esperimenti è stato utilizzato questo tipo di modellazione

- *Gouraud*: è un metodo di interpolazione per eliminare le sfaccettature, ma non funziona bene con sorgenti di illuminazione locali ed *highlight*.
- *Phong*: è un metodo di interpolazione delle normali, computazionalmente intensivo, per poter determinare un valore di illuminazione diverso in ogni punto. Si ottengono *highlight* realistici e bordi dolci tra i poligoni
- *Ray-tracing*: è un metodo per calcolare i percorsi dei raggi luminosi partendo dalla sorgente per arrivare all'osservatore o viceversa. Produce riflessioni speculari realistiche.

### **Proiezione**

Il metodo proiettivo, desunto dall'analisi dei fenomeni fisici dell'ottica a raggi, è il principio correntemente applicato per la corrispondenza tra i punti della scena e quelli sul piano-immagine. Il problema è stato affrontato fin dall'antichità da personaggi quali Polignoto ed Eschilo. Mentre nella *Computer Graphics* è quasi esclusivo l'utilizzo della prospettiva, nella letteratura riguardante lo *shape-from-shading* la scelta è rivolta alle proiezioni parallele. Queste eliminano l'effetto della distanza sulle dimensioni della proiezione di un oggetto sul piano-immagine (la restrizione prospettica di Stevin). Le rette proiettanti appartengono al fascio di parallele avente la direzione determinata dal punto di vista, mentre, nelle proiezioni centrali o prospettive, tali rette formano un semicono indefinito con vertice nel punto di vista (Paoluzzi, 1987).

Un problema legato alla proiezione sul piano-immagine è il *clipping* delle primitive tridimensionali che giacciono all'esterno del punto di vista. Occorre scartare tutte le primitive poste dietro l'osservatore, perché altrimenti si avrebbe un'inversione del cono visivo.

## **Paragrafo 3.1    Motore di rendering utilizzato**

A causa della ridotta accuratezza nella riproduzione dei principi fisici d'interazione con la luce delle superfici simulate dalla maggior parte dei software commerciali, si è provveduto ad implementare dei modelli di *shading* semplici ma matematicamente determinati. Anche se tali software, infatti, riescono ad ottenere dei *rendering* impressionanti, non è dato di sapere come questi siano determinati<sup>20</sup>.

La superficie utilizzata in tutti gli esperimenti è di tipo unidimensionale<sup>21</sup>: la profondità è dipendente dalla sola posizione sull'asse  $x$ . Ciò permette di semplificare moltissimo i calcoli del *rendering*: diversamente la complessità risulterebbe molto più elevata<sup>22</sup>. Questo tipo di superficie, infatti, sottoposto ad un'illuminazione a raggi paralleli (puntiforme a distanza infinita) risulta identica per ogni valore di  $y$ ; per cui, essendo lo *shading* indipendente dalla scala, è sufficiente analizzare il comportamento ottico della superficie su una sezione parallela all'asse  $x$ . L'unico problema che può insorgere è la possibilità che la quantità di luce irradiata indirettamente non venga quantificata correttamente. Ciò è stato risolto, non senza difficoltà, mediante un'adeguata taratura che compensa il problema (vedi Paragrafo 3.2).

### **Illuminazione**

L'intensità di ogni punto dello schermo è stata calcolata utilizzando diversi modelli di illuminazione, cui ci si riferirà nella parte sperimentale con i termini in "MAIUSCOLETTO". Essa è definita come funzione locale dei

---

<sup>20</sup> Ad esempio, il programma 3D-Studio ha la possibilità di modificare la forma e l'ampiezza dell'*highlight* di una superficie, senza tuttavia intervenire sul modello di *shading*, né sulle caratteristiche della sorgente luminosa.

<sup>21</sup> È definita da una equazione con un'unica variabile indipendente posta su un asse allineato al piano immagine.

<sup>22</sup> Vedi siti Web per una trattazione sulle difficoltà nell'ottenere lo *shading* in *Computer Graphics*.

vettori del *patch*  $x^{23}$  considerato: tali aree infinitesimali sono state descritte nella Figura 13 a p. 21. Di seguito sono state descritte le formulazioni matematiche dei modelli.

- Lambertiano SENZA *CAST-SHADOW*.

$$I_x = k_a I_a + k_d I_l (\mathbf{N}_x \cdot \mathbf{L})$$

Questo modello semplice è completamente locale, i termini  $k_a$  e  $k_d$ , che in questa formula sono stati inseriti perché i successivi modelli ne sono un'evoluzione, hanno valore 1, mentre  $I_a$  è 1/10  $I_l$  (la luce ambientale risulta 1/10 di quella diretta).

- LAMBERTIANO.

$$I_x = k_a I_a + \text{Shadow}(x) k_d I_l (\mathbf{N}_x \cdot \mathbf{L})$$

In esso il termine “*Shadow*” può assumere il valore di 0 o 1, a seconda che il *patch* considerato riceva illuminazione diretta o meno, essendo frapposta tra la luce ed il punto in questione un'altra zona della superficie. I termini  $k_a$  e  $k_d$  hanno valore 1, mentre i termini  $I_a$  e  $I_l$  hanno un rapporto di 1/10.

- RIFLETTENTE parziale.

$$I_x = k_a I_a (\theta_x / 180) + \text{Shadow}(x) k_d I_l (\mathbf{N}_x \cdot \mathbf{L}) + k_d \sum I_{x'} k(x, x')$$

Viene detta equazione di radiosity. Il termine  $\theta_x/180$  rappresenta un'attenuazione della illuminazione ambientale diffusa in funzione dell'angolo di *acceptance*  $\theta_x$  (vedi Paragrafo 2.4). Nella formula il termine  $k$  assume il valore:

$$k(x, x') = \frac{[\mathbf{N}_x \cdot (-\mathbf{R})][\mathbf{N}_{x'} \cdot \mathbf{R}] \text{View}(x, x')}{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{R})^2}$$

Viene definito il “*geometric factor*” e rappresenta la quantità di luce che, riflessa dal punto  $x$ , raggiunge il punto  $x'$ . La funzione “*View*” può assumere il valore di 0 o 1 a seconda che i due punti ( $x$  e  $x'$ ) “si vedano” o no (Christou e Koenderink, 1997).  $\mathbf{R}$  è il vettore che collega il punto  $x$  al punto  $x'$ ;  $k_d$  assume il valore 0.4 per simulare una superficie di un grigio medio (vedi oltre).

<sup>23</sup> Il termine *corsivo* “ $x$ ” si riferisce ad un punto di analisi della superficie, mentre quello stampatello “ $x$ ” indica l'asse cartesiano orizzontale.

- Riflettente e SPECULARE.

$$I_x = k_a I_a \sum_{\alpha=0}^{\theta_x} N_x \cdot A_\alpha + \text{Shadow}(x) k_d I_l (N_x \cdot L) + k_d \sum I_x k(x, x') + k_g I_l (N_x \cdot H)^n$$

In cui  $N \cdot A$  rappresenta il coseno per ogni angolo  $\alpha$  nell'*acceptance-angle*,  $k_d$  è stato fissato a 0.9;  $k_g$ , che rappresenta la quantità di luce riflessa nella direzione di massimo *highlight*, è stato fissato ad 1/10 di  $k_d$  ed  $n$ , lo “*sharpness factor*” (Todd e Mingolla, 1983) a 16.

Tutti i modelli sopra esposti sono basati sullo *shading* lambertiano, anche se la simulazione tramite questo modello risulta accurata soltanto per alcune forme. Lo si è utilizzato ugualmente perché è l'unico presente in letteratura ed è quello che permette di ottenere immagini a più elevato contrasto.<sup>24</sup>

### Implementazione

Nell'implementazione pratica, si è definita una funzione del tipo  $f(x)=z$  per poter eseguire una elaborazione più semplice nei primi passaggi. È stata eseguita una campionatura della funzione facendo in modo che l'intervallo sia minore di un pixel (*oversampling*: 0.8 pixel). Ciò ha permesso di definire un insieme di punti con coordinate  $(x, z)$  che sono la mediana della sezione in  $x$  dei *patch* tridimensionali. Ciò permette di semplificare tutti i calcoli: per calcolare la normale nel punto  $x$ , ad esempio, è sufficiente considerare la tangente alla funzione sulle coordinate bidimensionali (vedi Figura 30 e Figura 45). Inoltre, per ogni punto si è calcolato il termine *lunghezza* che rappresenta la dimensione in  $x$  del *patch* considerato.

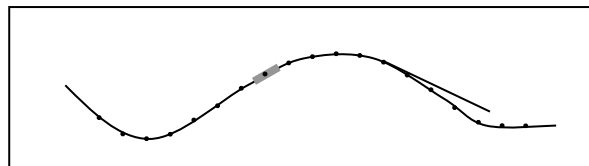
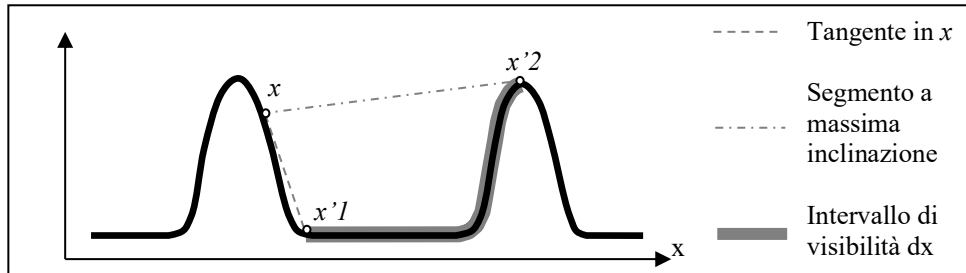


Figura 30: *Sampling* della superficie, rappresentazione grafica del termine *lunghezza* e tangente.

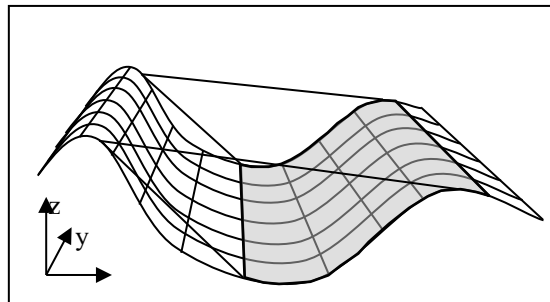
<sup>24</sup> Questa caratteristica ha reso impossibile rappresentare fedelmente gli stimoli sperimentali su supporto cartaceo. Il contrasto raggiungibile mediante un monitor CRT, infatti, è molto maggiore di quello ottenibile sulla carta stampata. Per questo motivo si è dovuto “comprimere la dinamica”.

Per poter determinare il termine *View* per ogni *patch*  $x$ , invece, si sono calcolati gli estremi degli intervalli di visibilità di destra e sinistra. I punti compresi hanno un valore di  $View(x, x')$  uguale a 1.



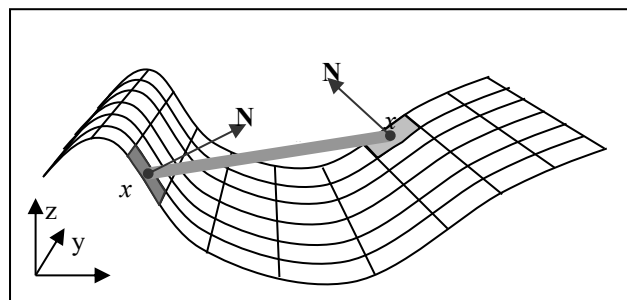
**Figura 31: INTERVALLO DI VISIBILITÀ DEL PUNTO  $x$ . La stessa analisi viene effettuata anche per il lato sn.**

Il punto  $x'1$  corrispondente all'intersezione tra la tangente ad  $x$  e la superficie; il punto  $x'2$  presenta il segmento congiungente a  $x$  con inclinazione maggiore (l'angolo sotteso con l'asse  $z$  serve per calcolare  $\theta_x$ ).



**Figura 32: Area che riflette su una linea verticale.**

Per i punti compresi nell'intervallo di visibilità si è provveduto a calcolare il resto del termine  $k(x, x')$ , che altrimenti è stato posto a 0.

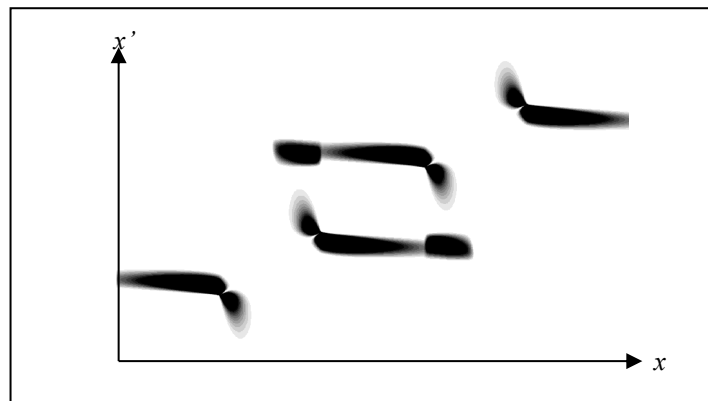


**Figura 33: PUNTI  $x$  E  $x'$ .**

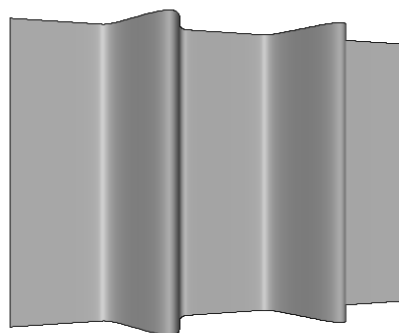
Per poterne determinare il valore con la migliore approssimazione possibile si è dovuto abbandonare lo spazio bidimensionale. Infatti, per

ogni coppia di punti,  $k(x, x')$  è funzione della normale dei due e del segmento che li congiunge. Questo termine varia spostandosi sull'asse  $y$ : cambia la posizione relativa dei due *patch*, per cui anche gli angoli espressi dai termini  $\mathbf{N} \cdot \mathbf{R}$  ed  $\mathbf{N} \cdot (-\mathbf{R})$ ; la distanza tra  $x$  e  $x'$  dipende dalla proiezione della distanza sull'asse  $x$  e dalla posizione sull'asse  $y$  di  $x'$ .

Per velocizzare le successive operazioni di applicazione del modello di *shading* e di proiezione sullo schermo i dati ottenuti da questa computazione sono stati memorizzati in un *modello* (vedi Figura 34) che contiene: le coordinate dei punti, le normali e la matrice  $k(x, x')$ . In questo modo risulta possibile rendere indipendenti i parametri intrinseci dell'oggetto lasciando la possibilità di modificare le condizioni di illuminazione ed il punto di vista.



**Figura 34: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLA MATRICE  $K(X, X')$  PER LA SUPERFICIE DELLA Figura 35. Le aree scure rappresentano le coppie di punti con maggior illuminazione passiva.**



**Figura 35: Rendering della superficie in prospettiva con modello di illuminazione SPECULARE.**

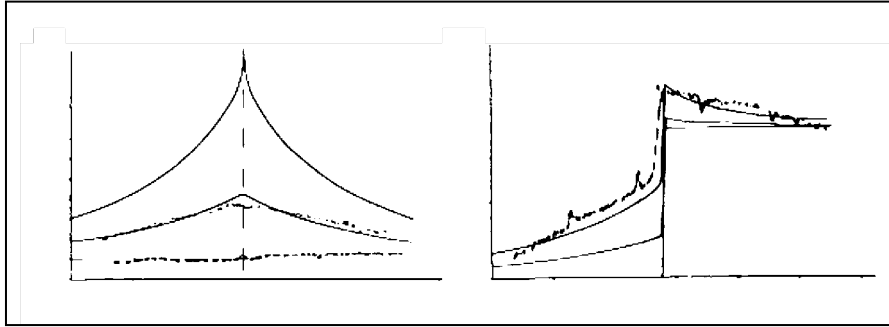


## **Paragrafo 3.2    Taratura**

La taratura del motore di *rendering* risulta piuttosto semplice solamente per gli stimoli in cui non viene considerata l'illuminazione passiva. In questi casi, infatti è sufficiente simulare una superficie piana (e, dunque, approssimativamente lambertiana), illuminata da una determinata sorgente luminosa e controllare con il fotometro che l'intensità luminosa dei pixel sullo schermo corrisponda quella di un foglio reale posto nelle stesse condizioni.

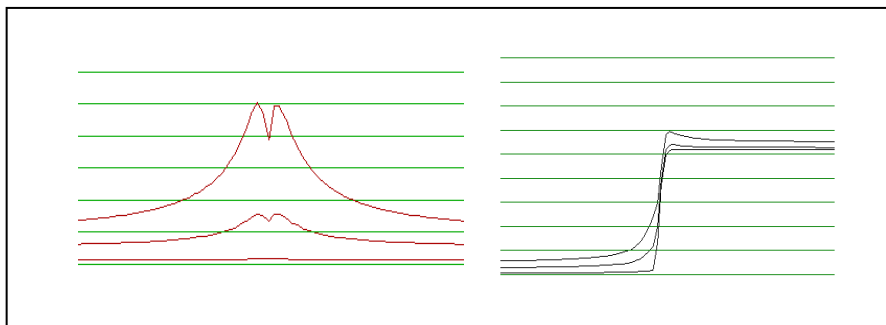
Per quanto riguarda, invece, le superfici con autoriflessione il metodo non è così diretto. Le misure con il fotometro, infatti non risultano sufficientemente articolate nello spazio per poter essere utilizzate. Un'idea della complessità che la distribuzione delle radianze può assumere è ben delineata nell'articolo di Forsyth e Zisserman (1991), ed è proprio sfruttando questo lavoro che si è proceduto.

Grazie alle misurazioni effettuate dai due ricercatori si è cercato di calcolare il fattore di attenuazione presente nell'equazione di *radiosity* del Paragrafo 3.1. Una delle scene che sono state analizzate era costituita da un semplice angolo retto, sottoposto a due diverse illuminazioni (vedi Figura 36). Le misure permettono di verificare l'andamento della radianza determinata da superfici con albedo diverso: con albedo  $\approx 0$  non si riscontrano modificazioni del pattern rispetto al modello lambertiano semplice, mentre con albedo crescente (0,5 e  $\approx 1$ ) la diversità si fa sempre maggiore



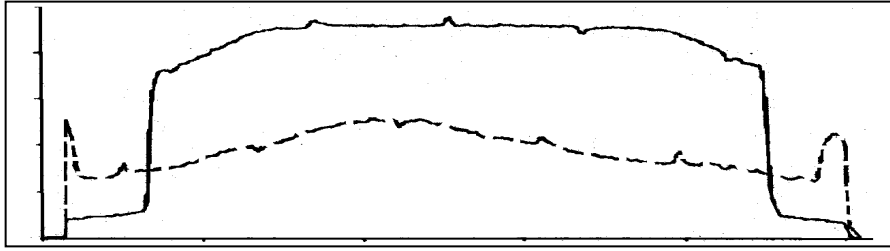
**Figura 36: PROFILO DI INTENSITÀ DELL'IMMAGINE DI UN ANGOLO A 90° CON DIVERSI ALBEDO. A sinistra illuminato in direzione della bisecante e a destra parallelamente a un piano. Le linee continue corrispondono a situazioni ideali, quelle tratteggiate a misure. Adattata da Forsyth e Zisserman, 1991.**

Questa simulazione non è del tutto precisa: il motore di *rendering* utilizzato non è perfettamente in grado di gestire la situazione al vertice (Figura 37). La diminuzione è dovuta al fatto che la luce al vertice dell'angolo è solamente quella diretta. Questo fenomeno è presumibilmente dovuto al fatto che in condizioni reali la superficie è ruvida, il che determina una certa quota di riflessione anche nella direzione del vertice.



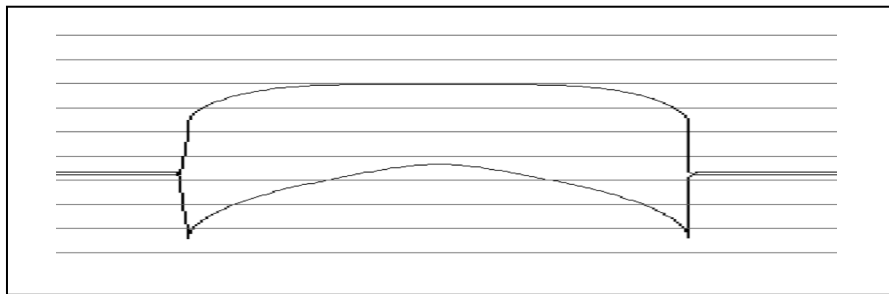
**Figura 37: LA STESSA SCENA DELLA Figura 36 SIMULATA DAL MOTORE IMPLEMENTATO. A sinistra si può notare l'errore commesso nel caso in cui la superficie non sia *smooth*.**

Una seconda misurazione è stata effettuata su un semicilindro concavo situato in una superficie a basso coefficiente di riflessione. Anche in questo caso la differenza tra le misure effettuate dai ricercatori è dovuta alla diversa quantità di luce riflessa dalla superficie



**Figura 38:** Profilo di radianza perpendicolare all'asse di una superficie semicilindrica concava: la linea continua di colore bianco, quella tratteggiata di colore nero. Adattata da Forsyth e Zisserman, 1991.

La Figura 38 evidenzia come le diverse proprietà di riflessione delle superfici utilizzate modifichino la forma del profilo di luminanza. Siccome l'algoritmo utilizzato assegna un solo valore di riflettanza a tutti i punti della superficie, si può notare una certa differenza tra la Figura 39 ottenuta dalla computazione e la precedente misurazione.

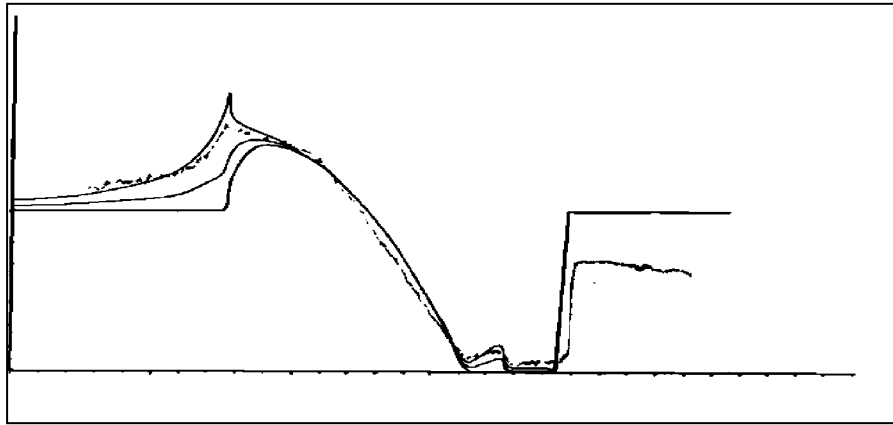


**Figura 39:** PROFILI DELL'INTENSITÀ DELL'IMMAGINE OTTENUTI SIMULANDO UN CILINDRO CONCAVO CON ALBEDO 1 E 0.01. Diversamente dalla Figura 38 la restante superficie ha lo stesso albedo.



**Figura 40:** Rendering ottenuto con il cilindro cavo con albedo 1.

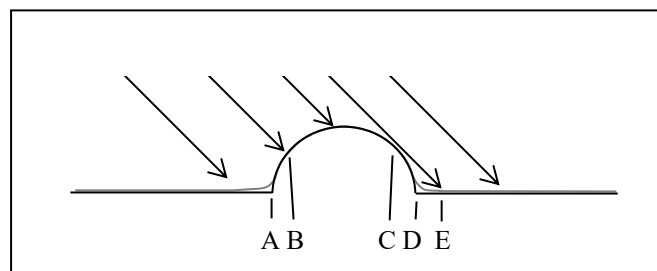
Infine, per verificare il comportamento dell'algoritmo con situazioni che includessero anche una *cast-shadow*, si è confrontata la misura effettuata dai ricercatori su di un semicilindro convesso illuminato diagonalmente.



**Figura 41: PROFILO DELL'INTENSITÀ D'IMMAGINE CON UN OGGETTO SEMICILINDRICO SU UN PIANO (VEDI Figura 42). Le tre linee continue corrispondono a distribuzioni ideali con albedo  $\approx 1$ ,  $\approx 0,5$  e  $\approx 0$ . La linea tratteggiata ad una misura. Adattata da Forsyth e Zisserman, 1991.**

Nella distribuzione delle curve della Figura 41 si nota come l'effetto della diversa riflettanza simulata sia presente nei punti di contatto tra il cilindro e la superficie. Con superfici scure, il profilo di luminanza rivela un pattern di *shading* determinato esclusivamente dall'orientamento locale e dalla *cast-shadow*. Le superfici che riflettono di più, invece, influiscono maggiormente sulle riflessioni, determinando due aumenti della luminosità nei punti convessi.

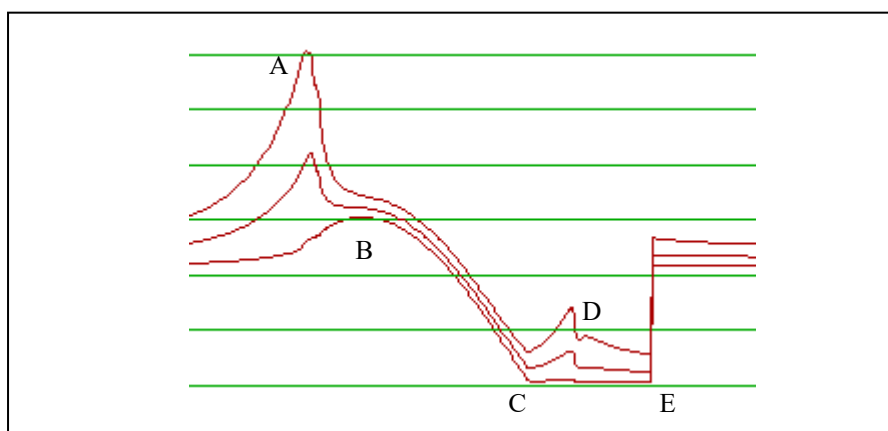
Dalla superficie utilizzata per la taratura sono stati tolti i punti di discontinuità con un processo di filtraggio. Ciò ha determinato una distribuzione della curvatura nei punti A e D della Figura 42.



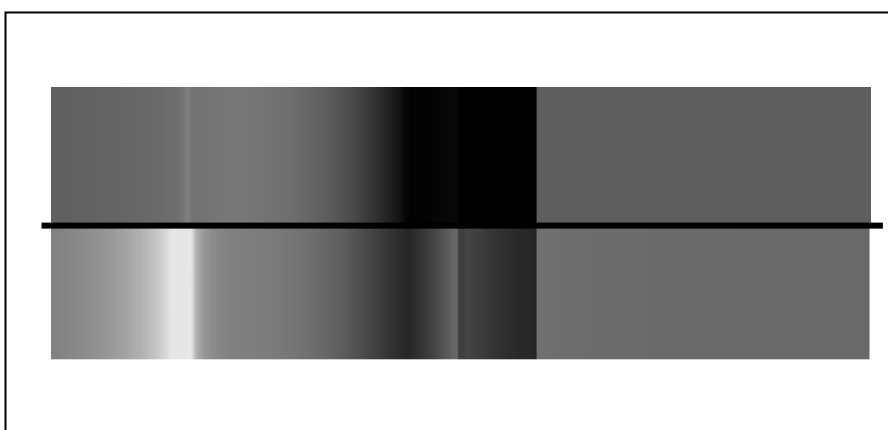
**Figura 42: SEZIONE LONGITUDINALE DELLA SCENA SIMULATA IN QUESTA PARTE DELLA TARATURA. La linea chiara si riferisce alla superficie definita nell'algoritmo implementato.**

Ciò ha permesso di ottenere dei profili dell'intensità dell'immagine continui, ma nei quali gli effetti dell'illuminazione indiretta risultano

esagerati come risulta evidente dal confronto della Figura 43 con la Figura 41.



**Figura 43: SITUAZIONE DELLA Figura 41 SIMULATA CON ALBEDO 1, 0.5 E 0.1. Le lettere si riferiscono alle zone indicate in Figura 42.**



**Figura 44: Rendering ottenuto con albedo 0.1 e 1 in due immagini distinte.**

## Capitolo 4 Esperimenti

«L'esperienza non ha alcun valore etico: è semplicemente il nome che gli uomini danno ai propri errori. »

Oscar Wilde

La percezione dello *shading* dipende da molti fattori nella scena: ad esempio, la posizione dell'illuminante determina una differenza nella forma percepita. Ci si è chiesti perché gli oggetti sembrano distorti se illuminati da direzioni differenti. Eppure nessuna ricerca ha mai affrontato esaustivamente il problema della costanza di forma di un oggetto definito solamente dallo *shading* e illuminato da una sorgente di luce in movimento. Le uniche ricerche compiute a proposito hanno evidenziato:

- un miglioramento della prestazione nel riconoscimento della forma delle superfici con una sequenza di otto immagini separate con illuminazione differente (Erens, Kappers e Koenderink, 1993);
- maggior precisione nel giudizio di orientamento locale con superfici che compiono una rotazione sull'asse verticale ed illuminate da una luce stazionaria (Norman, Todd e Phillips, 1995);
- che il sistema percettivo interpreta la scena come sottoposta ad un'illuminazione stazionaria e che nel sistema percettivo vi è l'incorporazione “*stationary light-source constraint*” (Kersten Mamassian e Knill, 1997; Kersten, Knill, Mamassian e Bülthoff, 1996; Mamassian, Knill e Kersten, 1998);
- che un oggetto complesso (un volto), sottoposto a due illuminazioni alternate, appare ruotato nel verso opposto (Troje e Siebeck, 1998);

- che, con stimoli fisicamente impossibili, il verso percepito della rotazione di una superficie in movimento è uguale a quello dell'illuminante in movimento (Domini e Caudek, 1996).

Nella parte sperimentale della tesi si vuole esplorare il ruolo della rotazione dell'illuminante sulla percezione della rotazione di una superficie unidimensionale con sezione determinata da funzioni sinusoidali senza bordi, né spigoli.

### **Sezione 4.1.1 Metodo generale**

#### **Soggetti**

Tutti i soggetti che hanno partecipato ai test sono studenti dell'Università di Trieste, con vista normale o corretta, ed erano ignari dello scopo degli esperimenti. Non sono stati retribuiti e si sono offerti spontaneamente. Hanno eseguito il compito individualmente, tranne per l'esperimento al Paragrafo 4.7, dove sono stati testati a coppie.

#### **Apparato**

Tutti gli stimoli computerizzati sono stati visualizzati su un monitor modello AcerView 56c con diagonale di 14'' e risoluzione di 800x600 pixel @ 75Hz 24 bit-colore, comandato da un PC con processore Pentium @ 200 MHz. Sono stati misurati i livelli di radianza generati mediante i 256 livelli di grigio ottenibili dal *software TrueBasic Bronze Edition Demo Version* (che vanno da 0,45 a 104 Nits) ed è stata determinata la funzione di trasformazione:

$$\text{radianza} = -4 * 10^{08} * \text{grigio}^{256^4} + 2 * 10^{05} * \text{grigio}^{256^3} - 0.0008 * \text{grigio}^{256^2} + 0.1861 * \text{grigio}^{256} + 0.448.$$

Siccome l'algoritmo implementato determinava un valore di radianza "virtuale" riflesso dalla superficie verso l'osservatore, si è poi provveduto a calcolare la formula inversa per poter determinare quale grigio utilizzare per una determinata radianza calcolata:

$$\text{grigio}^{256} = -0.0000035X^4 + 0.001X^3 + -0.1027X^2 + 6.2802X - 2.6505.$$

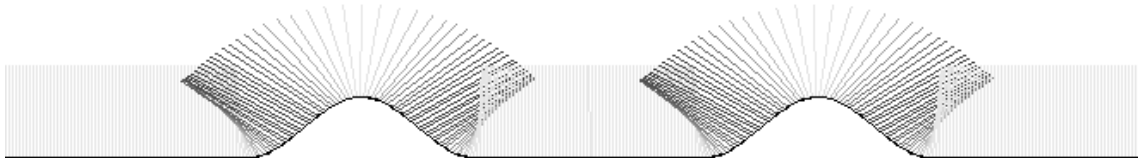
Lo schermo è stato posto alla stessa altezza degli occhi del soggetto ad una distanza di 1 m. Gli osservatori potevano guardare lo stimolo monocolarmente, scegliendo l'occhio che preferivano. Sul monitor è stato montato uno schermo di riduzione di 6 cm d'altezza e 8 di larghezza in modo che lo stimolo effettivamente visibile sottendesse un angolo visivo di  $5^\circ$  in orizzontale e  $3.5^\circ$  in verticale. Per gli stimoli computerizzati non sono state applicate restrizioni ai movimenti della testa, mentre per le superfici solide il soggetto appoggiava la testa ad un *chin-rest*. Le stanze degli esperimenti erano buie durante tutta la durata delle sessioni.

### Stimolo

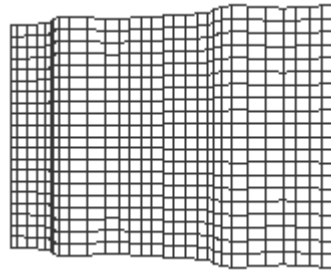
Il motore di rendering descritto al Paragrafo 3.1 è stato applicato ad una superficie definita dall'equazione:

$$\begin{cases} |x_i| < x_m; |x_i| > 3x_m & \rightarrow z_i = 0 \\ x_m \leq |x_i| \leq 3x_m & \rightarrow z_i = \sin\left(90 \frac{|x_i| - x_m}{x_m}\right) z_m \end{cases}$$

dove  $2x_m$  rappresenta l'ampiezza sull'asse x di due "bump" di forma sinusoidale e  $z_m$  ne rappresenta l'ampiezza sull'asse z. Sono state dunque tracciate cinque aree verticali, di cui le dispari piane e le pari modellate con una funzione sinusoidale sul piano x-z.



**Figura 45: SEZIONE ORIZZONTALE DELLA SUPERFICIE SIMULATA CON LE NORMALI. I due "bump" sono rivolti verso l'osservatore.**



**Figura 46: Superficie tridimensionale in prospettiva.**



La sequenza video era composta di 11 frame per una durata totale di circa 2.3 sec. Ogni frame aveva una permanenza di 160-170 msec. Dove non specificato diversamente, la sequenza video così composta veniva ripetuta all'infinito con un intervallo tra ogni presentazione di 2 sec, durante i quali lo schermo aveva una luminanza pari alla media degli stimoli dell'esperimento.

### **Pretest**

Ai soggetti cui è stato presentato lo stimolo computerizzato si è fornita una spiegazione del compito affidato, mostrando un cartoncino di forma simile alla superficie che in seguito avrebbero visto sul monitor. Con i contorni esterni ed una proiezione prospettica. Veniva simulata una rotazione sull'asse verticale di  $+ e - 30^\circ$  con illuminante stazionario. Contemporaneamente, si chiedeva di riportare il verso percepito della concavità e di manipolare l'orientamento di un bastoncino con fulcro al centro, facendolo muovere come lo stimolo.

Alla fine della spiegazione, i soggetti partecipavano ad una fase di pretest, in cui la superficie, simulata con il modello Lambertiano, compiva una rotazione di  $\pm 5^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ$ . Ai partecipanti veniva richiesto di stimare la direzione della convessità/concavità, il verso e la quantità di rotazione e di riportare la risposta verbalmente. Dopo ogni risposta veniva fornito un feedback. Se il soggetto non raggiungeva il 70% di risposte corrette veniva scartato.

### **Procedura**

Il compito del soggetto era quello di muovere una barretta in maniera che avesse la stessa inclinazione della superficie simulata alla fine della sequenza d'animazione e di riportare a voce il verso della concavità. Se il soggetto percepiva la superficie con due *bump* convessi, l'angolo di rotazione percepito veniva codificato come positivo se concordava con il verso della superficie e negativo in caso contrario. Se, invece, riportava che la superficie fosse concava, l'angolo di rotazione veniva codificato al contrario. Così facendo, le risposte che concordano con il verso di rotazione simulato hanno valore positivo, mentre quelle contrarie hanno

valore negativo. L'inversione del segno con la concavità è stato reso necessario dall'analisi delle risposte ad un esperimento i cui risultati non sono stati riportati e dal fatto che anche nel lavoro di Cadek e Domini (1996) è stato utilizzato un metodo simile. Lo stimolo utilizzato, infatti, ha un aspetto bistabile ed anche il *train* non risulta sufficiente a determinare una percezione costante. Se la sequenza viene interpretata come determinata da un oggetto concavo, piuttosto che convesso, la rotazione risultante è nel verso opposto.

Per ottenere un'analisi più precisa del vero di rotazione percepito è stata utilizzata una successiva ricodifica delle risposte in modo binario: se il verso della risposta concorda con quello simulato è stato assegnato il valore 1, se è contrario 0.

## **Paragrafo 4.2    Esperimento 1**

Dall'analisi della letteratura fornita nella prima parte di questo scritto non si riscontrano dati sufficienti a descrivere esaustivamente il comportamento del sistema percettivo in presenza di luci con movimento relativo alla superficie. Si è pertanto cercato di rispondere a questo problema mediante un esperimento che determinasse se, in condizione di illuminazione dinamica, il sistema visivo potesse dare dei percetti veridici.

Alcune ricerche hanno chiarito l'influenza della *reflectance-map* sulla percezione (vedi Sezione 1.2.4, Paragrafo 2.2 e Paragrafo 2.3). Proprio per questo motivo, gli esperimenti effettuati sono caratterizzati da diverse proprietà di riflessione. Sono stati utilizzati, infatti, stimoli opachi senza illuminazione indiretta (con un comportamento fotometrico, cioè, molto simile alle superfici nere e opache), stimoli con albedo medio e altri con albedo elevato, sui quali sono stati applicati degli highlight, che risultano simili a materiali bianchi e lucidi. L'oggetto così simulato è ecologicamente plausibile, includendo sia le *cast-shadow* che gli *highlight* che l'illuminazione indiretta.

Il compito consiste nella determinazione del verso e ampiezza della rotazione di una superficie sottoposta a tre diverse condizioni di illuminazione: con luce stazionaria, con luce in movimento coerente con quello della superficie ed inversa rispetto ad essa. Rispetto all'esperimento di Domini e Caudek (1996), qui verranno utilizzati stimoli più semplici nella forma, ma con un modello di illuminazione fisicamente plausibile.

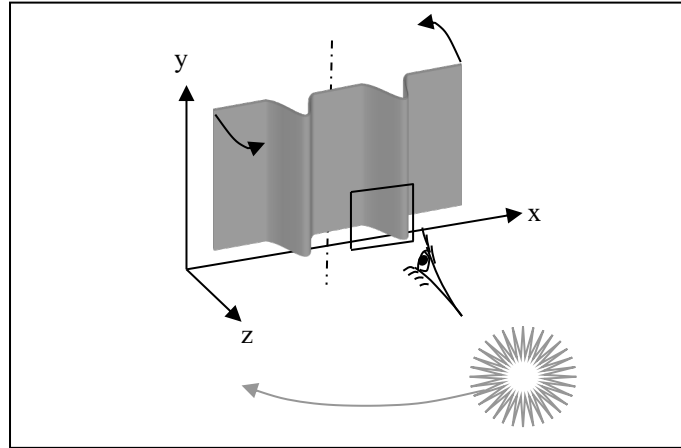
Abbiamo già visto al Paragrafo 2.6 che se un oggetto ruota su se stesso e la luce rimane ferma, il pattern di illuminazione non rimane uguale nel tempo: rispetto alla superficie considerata, l'illuminante non è sempre nello stesso punto. Un oggetto in movimento è quindi sottoposto ad un'illuminazione dinamica. I risultati ottenuti da Norman, Todd e Phillips

(1995), da Domini e Caudek (1996) e da alcuni esperimenti preliminari non riportati, indicano che il sistema percettivo riesce ad utilizzare questa informazione. Quindi, anche in questo caso, ci si aspetta che i soggetti possano identificare correttamente il verso di rotazione se percepiscono la forma simulata tramite lo *shading*. Infatti, il prerequisito dell'analisi del movimento dell'oggetto è l'estrazione dell'informazione sulla forma della superficie dallo *shading*.

Le risposte attese dovrebbero evidenziare un errore sistematico nella condizione di rotazione opposta della superficie e della luce (Domini e Caudek, 1996): lo spostamento dell'illuminante, infatti, dovrebbe apportare una certa informazione interpretata dal soggetto come quota aggiuntiva di rotazione sommata o sottratta alla rotazione propria della superficie. I diversi modelli utilizzati dovrebbero determinare lo stesso pattern di risposte da parte del soggetto, modificando tuttavia l'ampiezza dell'effetto. Nella condizione di controllo non dovrebbero esserci differenze nel verso di rotazione percepito, ma soltanto nella sua ampiezza; viceversa, nelle altre due condizioni dovrebbero esserci differenze in entrambi.

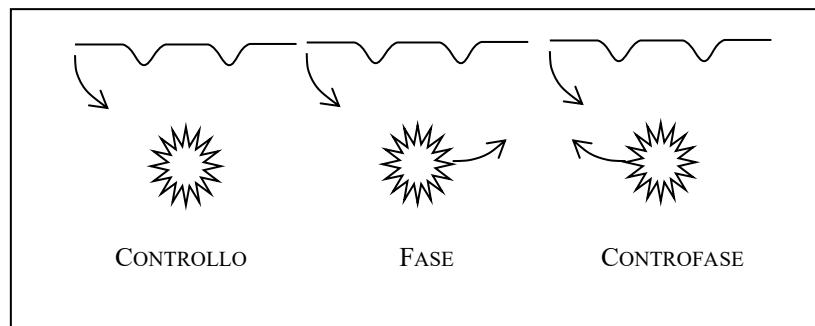
### **Sezione 4.2.1 Metodo**

In questo esperimento sono stati testati 12 soggetti divisi in tre gruppi. Ogni gruppo è stato caratterizzato da una stimolazione creata con un diverso MODELLO di illuminazione, LAMBERTIANA, RIFLETTENTE parziale e riflettente SPECULARE. Ad ogni gruppo sono state mostrate 24 sequenze video randomizzate di circa (ognuna ripetuta fino alla risposta): 12 con superficie che ruota a destra e 12 a sinistra. Per i due versi della rotazione si sono definite 3 CONDIZIONI ognuna delle quali è stata ripetuta per 4 volte.



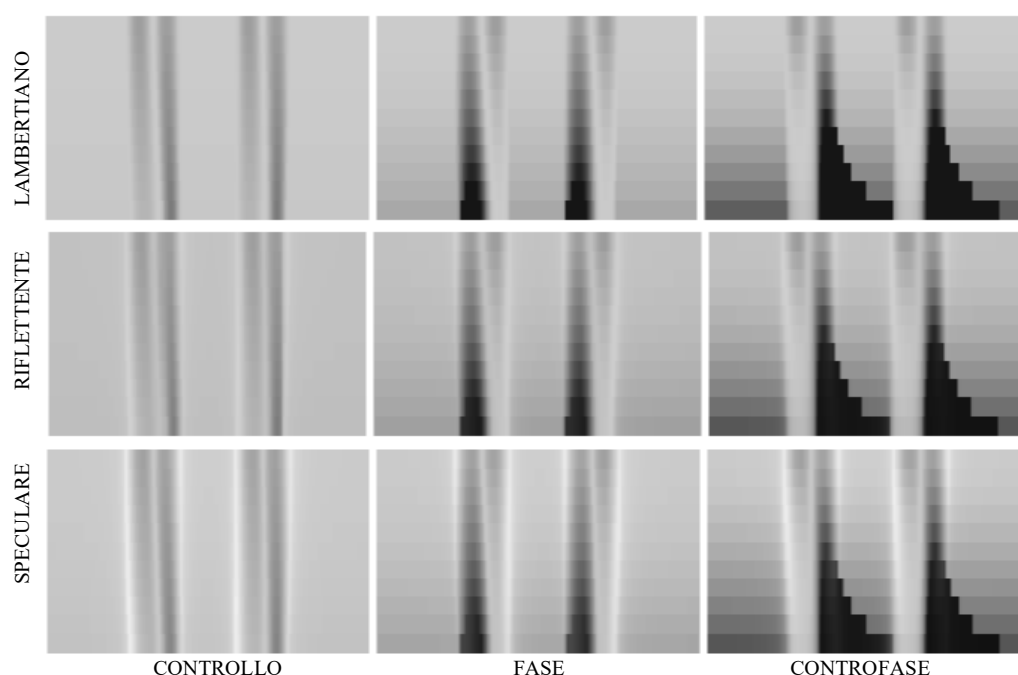
**Figura 47: Rotazione della superficie e dell'illuminazione nella condizione CONTROFASE.**

Nella condizione di CONTROLLO la superficie compiva una rotazione di  $15^\circ$  sull'asse y e l'illuminante rimaneva stazionario; nella condizione detta FASE la superficie e l'illuminante ruotavano nella stessa direzione rispetto al sistema di riferimento con un'ampiezza di rispettivamente  $15^\circ$  e  $60^\circ$ ; nella condizione CONTROFASE i due ruotavano entrambi, ma in senso inverso e con ampiezze uguali alla condizione precedente (Figura 48).



**Figura 48: Rotazione della superficie e dell'illuminante rispetto all'asse y per la variabile within CONDIZIONE.**

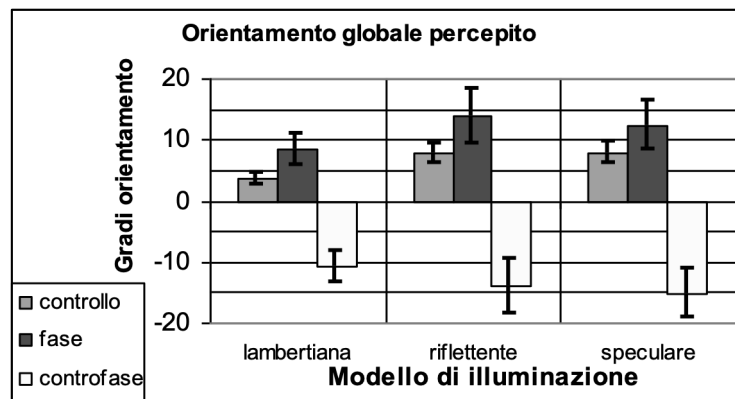
Gli stimoli ottenuti sono stati rappresentati nei seguenti diagrammi spazio-temporali alla Figura 49.



**Figura 49: DIAGRAMMI SPAZIO-TEMPORALI DEI FRAME UTILIZZATI COME STIMOLAZIONE NELL'ESPERIMENTO 1. La parte superiore rappresenta l'inizio della sequenza e la parte inferiore la fine.**

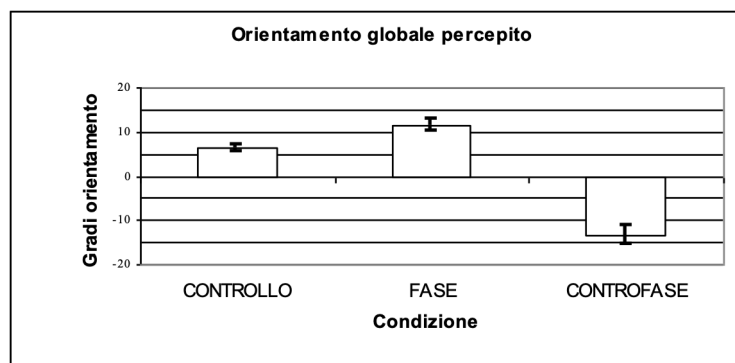
### **Sezione 4.2.2 Risultati**

I partecipanti all'esperimento hanno in genere descritto gli stimoli come un foglio con due piegature verso di loro, oppure come un muro con due colonne che ruota sull'asse verticale. Molti erano consapevoli del fatto che l'illuminazione non fosse stazionaria, anche se tale informazione non veniva fornita. Due soggetti del gruppo LAMBERTIANO hanno riportato di vedere la superficie concava in 4 e 5 degli 8 stimoli della sola condizione CONTROLLO con il solo modello LAMBERTIANO. La proporzione di risposte veridiche per ogni soggetto di ogni condizione è stata trasformata utilizzando la "trasformazione arcoseno" (Winer, 1971). I dati ottenuti sono rappresentati nei grafici seguenti distinguendo i diversi MODELLI di illuminazione.



**Figura 50: AMPIEZZA DELLA ROTAZIONE PERCEPITA NELLE VARIE CONDIZIONI.** In tutti i grafici seguenti le barre rappresentano lo S.E.

Un'Anova per misure ripetute sulla quantità di rotazione percepita con CONDIZIONE come variabile within e MODELLO come variabile between ha evidenziato un effetto significativo della variabile CONDIZIONE ( $F(2,18)=62.174$ ,  $p<0.001$ ). Né la variabile MODELLO ( $F(2,9)=0.435$ , n.s.), né l'interazione MODELLO-CONDIZIONE ( $F(4,18)=0.942$ , n.s.) sono significative.

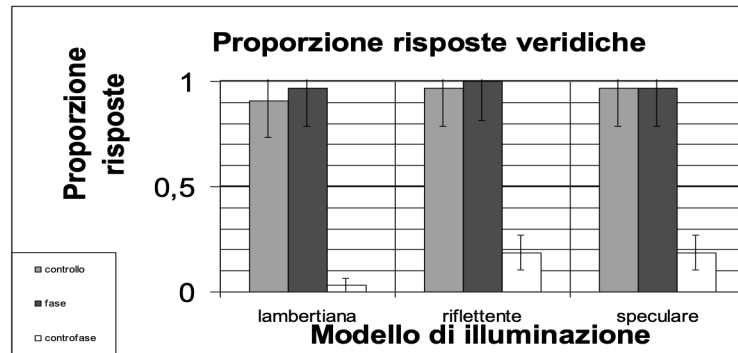


**Figura 51: Raggruppamento dell'ampiezza della rotazione media percepita nelle sole condizioni within.**

Le condizioni FASE ( $F(1,9)=32.171$ ,  $p<0.001$ ) e CONTROFASE ( $F(1,9)=55.903$ ,  $p<0.001$ ) differiscono significativamente dal CONTROLLO. Le condizioni FASE e CONTROFASE differiscono significativamente ( $F(1,9)=32.171$ ,  $p<0.001$ ).

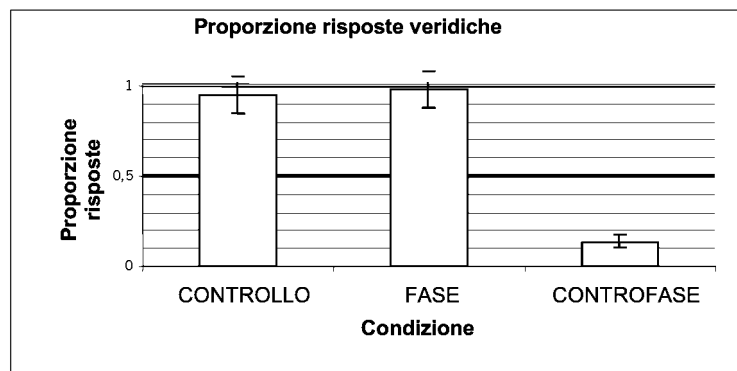
Il confronto tra la rotazione percepita e quella simulata di  $15^\circ$  mediante t-test evidenzia che una significativa sottostima sia nel CONTROLLO ( $t(11)=-11.067$ ,  $p<0.001$ ) sia in FASE ( $t(11)=-2.774$ ,  $p<0.05$ ).

La rotazione media registrata è rispettivamente di  $6.510^\circ$  (S.E.= $0.767^\circ$ ) e  $11.562^\circ$  (S.E.= $1.239^\circ$ ). Con una media della rotazione percepita di  $-13.312^\circ$  (S.E.= $2.400^\circ$ ), anche la condizione CONTROFASE differisce significativamente dal valore simulato di  $15^\circ$  ( $t(11)=-11.797$ ,  $p<0.001$ ).



**Figura 52: Proporzione risposte veridiche del verso di rotazione nelle varie condizioni.**

Un'Anova 1 within (CONDIZIONE: CONTROLLO, FASE, CONTROFASE)  $\times$  1 between (MODELLO: LAMBERTIANO, RIFLETTENTE, SPECULARE) sulle risposte binarie trasformate evidenzia un effetto significativo del fattore CONDIZIONE ( $F(2,18)=162.912$ ,  $p<0.001$ ). La variabile MODELLO non è significativa ( $F(2,9)=1.479$ , n.s.), e nemmeno l'interazione tra MODELLO e CONDIZIONE ( $F(4,18)=0.628$ , n.s.).



**Figura 53: Media delle proporzioni delle risposte veridiche non suddivise per modello di illuminazione.**

La proporzione di risposte veridiche è 0.95 per la condizione di CONTROLLO, 0.98 per la condizione fase e 0.14 per la condizione CONTROFASE. Il confronto con il CONTROLLO rivela una differenza significativa per la condizione CONTROFASE ( $F(1,9)=187.585$ ,  $P<0.001$ ), ma



non per la condizione FASE ( $F(1,9)=1.800$ , n.s.). Le condizioni FASE e CONTROFASE differiscono significativamente ( $F(1,9)=254.525$ ,  $p<0.001$ ).

Un T-test ha evidenziato che le condizioni CONTROLLO ( $t(11)=11.818$ ,  $p<0.001$ ) e FASE ( $t(11)=17.859$ ,  $p<0.001$ ) sono significativamente maggiori del caso (valore 0.5), mentre CONTROFASE è significativamente inferiore ( $t(11)=-5.947$ ,  $p<0.001$ ).

Un'analisi dei valori *assoluti* della rotazione angolare percepita indica che il fattore CONDIZIONE risulta significativo ( $F(2,18)=5.111$ ,  $p<0.05$ ) e che le condizioni FASE ( $F(1,9)=32.171$ ,  $p<0.001$ ) e CONTROFASE ( $F(1,9)=6.713$ ,  $p<0.05$ ) differiscono dal CONTROLLO.

### **Sezione 4.2.3 Discussione**

Le risposte evidenziano che i soggetti rispondono in modo generalmente corretto in un compito di valutazione dell'orientamento di una superficie quando la stimolazione è data dalla rotazione dell'oggetto con illuminante stazionario. La stessa conclusione è stata tratta anche da Domini e Caudek (1996) e da Norman, Todd e Phillips (1996).

Nelle altre due condizioni, i dati evidenziano che la rotazione della direzione di illuminazione determina:

- nella condizione CONTROFASE una completa inversione del verso percepito, ma con una quantità della rotazione simile a quella simulata;
- nella condizione FASE una maggiore quantità di rotazione percepita rispetto al CONTROLLO. Lo spostamento dell'illuminante, cioè, apporta una certa quota di rotazione nella percezione che può sommarsi a quella della superficie.

Ciò è presumibilmente dovuto ad un fallimento della costanza di forma dell'oggetto che risulterebbe in una rotazione non rigida. Questo risultato differisce rispetto ai dati ottenuti da Mingolla e Todd (1996), che

non hanno riscontrato variazioni nel giudizio di orientamento locale con diverse direzioni di illuminazione.

I tre modelli di illuminazione evidenziano risposte identiche e sono coerenti con quelli ottenuti da Domini e Caudek (1996) con stimoli fisicamente impossibili.

I dati ottenuti suggeriscono che le assunzioni sull'illuminazione della scena (Ramachandran, 1988abc) come la “*stationary light-source assumption*” (ad esempio Kersten, Mamassian e Knill, 1997)<sup>25</sup> non siano applicabili in questa situazione. Se il soggetto assumesse la luce come proveniente dallo stesso punto, non ci dovrebbero essere inversioni nella percezione della rotazione in CONTROFASE, ma piuttosto un aumento della quantità della rotazione percepita. Inoltre, nella condizione FASE si dovrebbe registrare un orientamento globale percepito minore di quello con illuminante statico, invece è stato riscontrato un aumento.

Il *bias* rilevato è *opposto* a quello ottenuto da Troje e Siebeck (1998) e risulta coerente con i dati relativi alla dipendenza tra forma statica percepita e direzione di illuminazione (Christou e Koenderink, 1996; Koenderink, van Doorn, Christou e Lappin, 1996; Koenderink, van Doorn e Kappers, 1995)<sup>26</sup>. Il *bias* riscontrato, inoltre, ha un *ampiezza maggiore* di quello individuato da questi studiosi: in letteratura non supera i 7°, mentre nel nostro caso è di circa 13° nel *verso opposto* alla rotazione della superficie che ruota di 15°.

Pentland (1982) afferma che la direzione dell'illuminante può essere stimata correttamente, ma, dai dati ottenuti, ciò non sembra essere sufficiente alla determinazione della quota di informazione dovuta al suo movimento.

---

<sup>25</sup> Vedi p. 62.

<sup>26</sup> Vedi p. 47.

## **Paragrafo 4.3    Esperimento 2**

Con questo esperimento si vuole verificare se l'errore riscontrato nella condizione di rotazione in CONTROFASE compaia anche con stimolazione statica, presentando, cioè, solo l'ultima delle frame dell'esperimento 1. Il *bias* indotto dalla rotazione dell'illuminante potrebbe essere solamente un fattore dovuto al movimento: in condizione statica i soggetti potrebbero "compensare" gli effetti della direzione dell'illuminazione e percepire correttamente l'orientamento dell'oggetto simulato. In tal caso, il pattern di risposte riscontrato con illuminazione dinamica sarebbe attribuibile alla sola direzione finale dell'illuminazione.

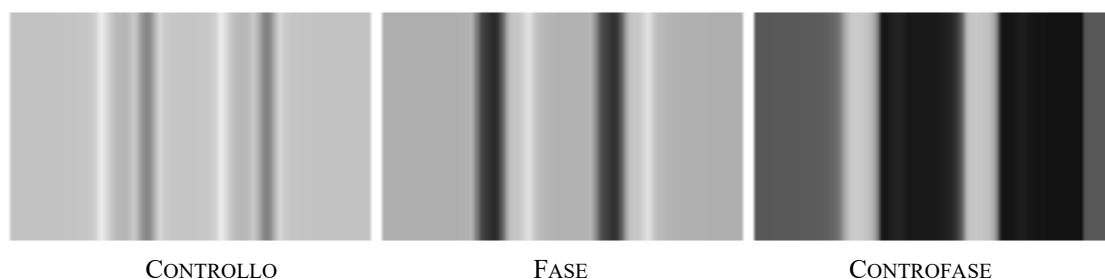
Ci si aspetta che i soggetti diano delle risposte veridiche in tutte le condizioni di stimolazione, ma l'ampiezza della condizione FASE dovrebbe essere sensibilmente inferiore alle altre, in quanto la parte più chiara del *bump* dovrebbe risultare in primo piano<sup>27</sup>.

### **Sezione 4.3.1    Metodo**

Ai 10 soggetti testati è stata presentata un'immagine costituita dall'ultima frame generata con il modello di illuminazione SPECULARE. La stimolazione era statica e veniva richiesto otto volte di stimare l'orientamento globale della superficie per ogni condizione casualizzata. Lo stimolo rimaneva visibile fino a quando il soggetto non rispondeva. Tutte le altre condizioni equivalevano alle precedenti.

---

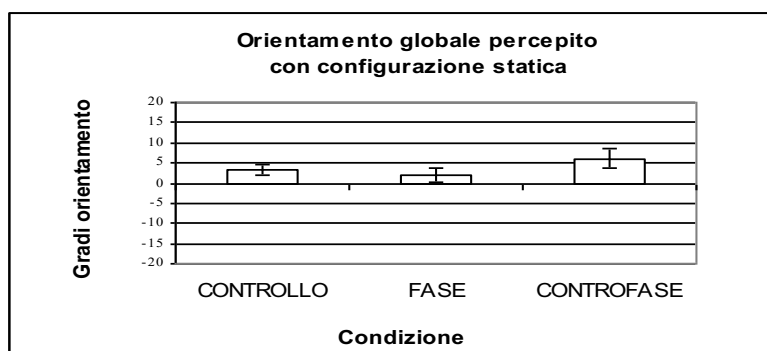
<sup>27</sup> Vedi Sezione 1.2.3.



**Figura 54:** Stimoli utilizzati nell'esperimento 2 con rotazione destra della superficie.

### Sezione 4.3.2 Risultati

La difficoltà del compito è resa subito evidente dalla proporzione delle risposte corrette nella condizione di CONTROLLO e dall'esiguità dell'ampiezza della rotazione media percepita.

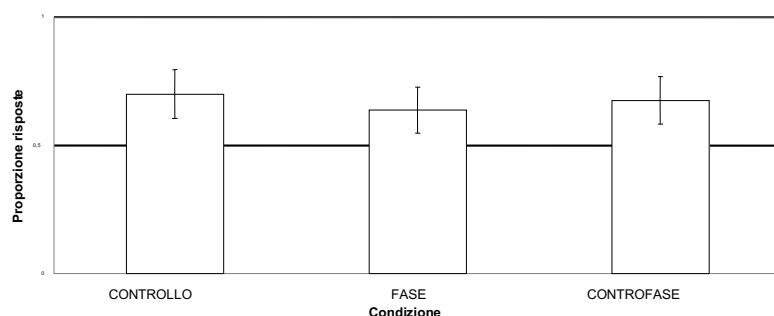


**Figura 55:** Ampiezza angolare delle risposte sull'orientamento globale.

In tutte le condizioni sperimentali i giudizi medi di orientamento globale della superficie sono nella direzione veridica.

Un'Anova per misure ripetute sull'ampiezza riportata dai soggetti non rivela un effetto significativo della variabile CONDIZIONE ( $F(2,18)=1.653$ , n.s.). L'ampiezza media riscontrata è  $3.362^\circ$  nel CONTROLLO,  $1.975^\circ$  nella condizione FASE,  $6.100^\circ$  nella condizione

CONTROFASE. Un t-test a campione singolo evidenzia che l'orientamento viene sottostimato rispetto a quello simulato ( $15^\circ$ ) in tutte le condizioni (CONTROLLO:  $t(9) = -10.098$ ,  $p < 0.001$ ; FASE:  $t(9) = -12.709$ ,  $p < 0.001$ ; CONTROFASE:  $t(9) = -3.862$ ,  $p < 0.01$ ).



**Figura 56: PROPORZIONE DI RISPOSTE VERIDICHE.**

La proporzione di risposte veridiche è 0.70 nella condizione di CONTROLLO, 0.64 nella condizione FASE e 0.68 nella condizione CONTROFASE. Tuttavia un t-test con campione singolo ha rivelato che le proporzioni dei corretti sono diverse da 0.5 per ogni condizione (CONTROLLO:  $t(9) = 4.311$ ,  $p < 0.01$ ; FASE:  $t(9) = 2.283$ ,  $p < 0.05$ ; CONTROFASE:  $t(9) = 2.941$ ,  $p < 0.05$ ).

Un'Anova per misure ripetute sulla proporzione di risposte corrette trasformata non evidenzia un effetto significativo della variabile CONDIZIONE ( $F(2,18) = 0.155$ , n.s.).

### **Sezione 4.3.3 Discussione**

I dati ottenuti confermano che l'effetto di inversione della direzione percepita della rotazione si registra solamente in condizione di stimolazione dinamica, mentre con stimolazione statica la direzione è sempre percepita correttamente, ma sottostimata in tutte le condizioni (anche la sovrastima nella condizione in fase sembra scomparire). Complessivamente, dai dati

---

rilevati nei due esperimenti si evince che esiste una dipendenza tra la percezione dei soggetti e il movimento dell'illuminante.

I risultati raccolti in condizione di stimolazione statica sono coerenti con quelli ottenuti da Mingolla e Todd (1986): la percezione dell'orientamento globale della superficie è indipendente dalla direzione di illuminazione.

## **Paragrafo 4.4    Esperimento 3**

In questo esperimento viene utilizzata una misura di tipo psicofisico per determinare i P.E.S., che separano le risposte veridiche da quelle errate, nella condizione in CONTROFASE.

Confrontando i dati ottenuti da Domini e Caudek (1996) con quelli esposti al Paragrafo 4.2, è stato possibile verificare che la *quantità* di rotazione dell'illuminante genera un diverso pattern di risposte. Si è quindi variata l'ampiezza della rotazione in modo sistematico per verificare il l'andamento nel verso di orientamento globale percepito.

Si è voluto testare, inoltre, la dipendenza del *bias* riscontrato dalla forma dell'oggetto, mediante variazione della profondità della superficie simulata. La maggior profondità dei *bump* dovrebbe aumentare l'informazione disponibile sulla rotazione della superficie rispetto a quella dell'illuminazione. Ciò dovrebbe modificare anche il PES, perché con superfici più profonde è necessaria una quantità maggiore di rotazione della sorgente luminosa per determinare un percepito affetto da *bias*.

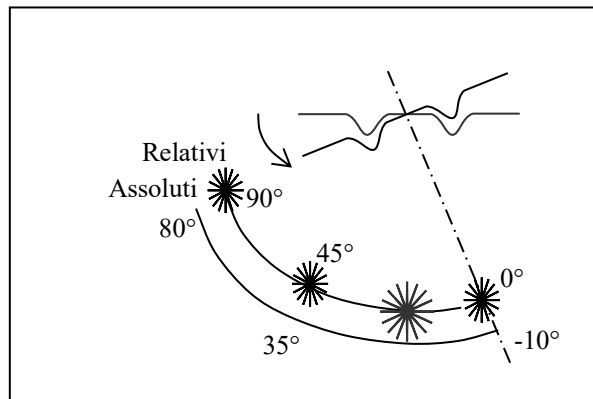
Ci si attendeva che i soggetti fornissero una risposta veridica quando l'illuminante compiva uno spostamento contenuto. Quando la quantità della rotazione aumentava, invece, i soggetti avrebbero dovuto fornire delle risposte affette da un errore sistematico, come nell'esperimento 1.

### **Sezione 4.4.1    Metodo**

La rotazione della superficie era di 10°. Le CONDIZIONI per ogni soggetto erano determinate dalla diversa ampiezza della rotazione

dell'illuminante, a partire da  $0^\circ$  rispetto alla superficie con step di  $10^\circ$  fino a un massimo di  $90^\circ$  rispetto alla superficie (siccome la rotazione della superficie è di  $10^\circ$  l'illuminante può ruotare al massimo di  $80^\circ$  assoluti, vedi Figura 57).

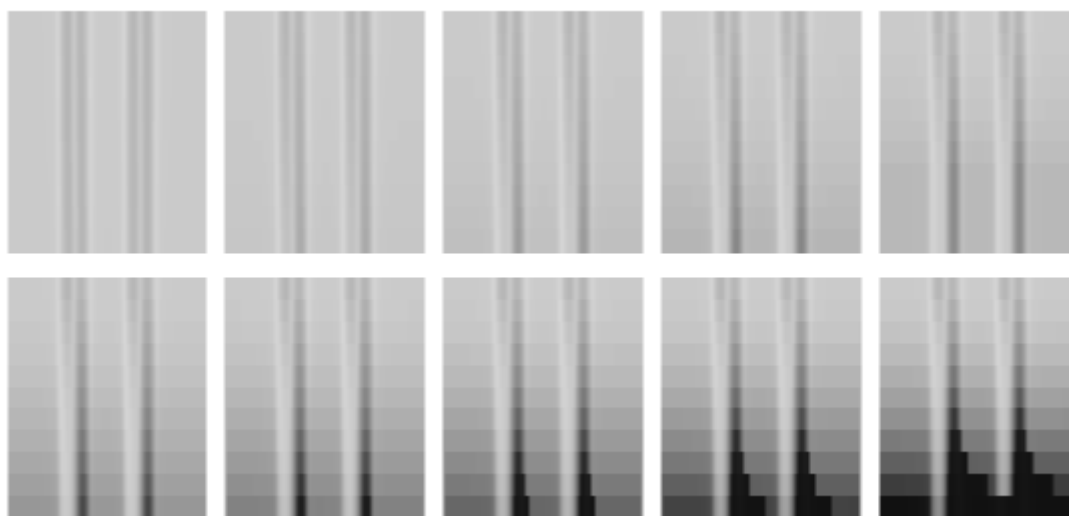
Il compito affidato al soggetto era di determinare il *verso* della rotazione di 80 stimoli randomizzati mediante la pressione di due tasti. Il soggetto aveva la possibilità di ripetere lo stimolo fino a tre volte mediante un terzo tasto.



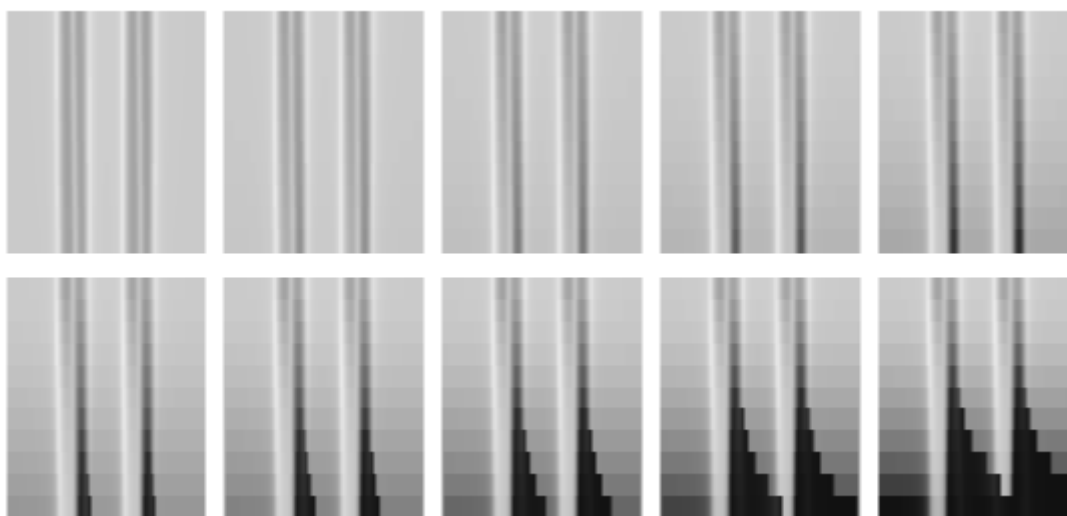
**Figura 57: ROTAZIONE RELATIVA E ASSOLUTA.**

Sono stati confrontati due gruppi di 10 soggetti ciascuno, per i quali la stimolazione presentata era data da una superficie con diversa PROFONDITÀ delle sinusoidi identificata mediante le condizioni PROFONDO e PIATTO.





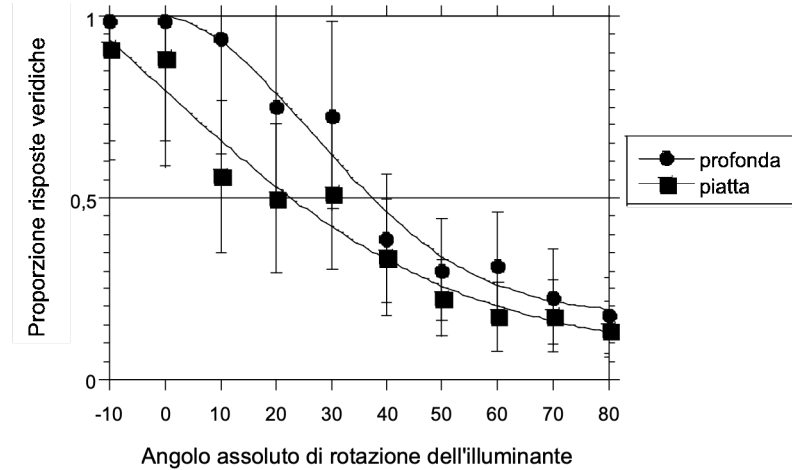
**Figura 58: DIAGRAMMI SPAZIO-TEMPORALI DEI FRAME UTILIZZATI COME STIMOLAZIONE NELL'ESPERIMENTO 4 PER LA CONDIZIONE PIATTO. La parte superiore rappresenta l'inizio della sequenza e la parte inferiore la fine. Partendo da sinistra in alto (stimolo con illuminazione statica rispetto alla superficie) la rotazione dell'illuminante aumenta di  $10^\circ$  per ogni diagramma.**



**Figura 59: Diagrammi spazio-temporali dei frame utilizzati come stimolazione nell'esperimento 4 per la condizione PROFONDO. Vedi didascalia della Figura 58.**

### Sezione 4.4.2 Risultati

La proporzione media delle risposte veridiche è rappresentata in Figura 60.



**Figura 60: PROPORZIONE MEDIA DELLE RISPOSTE VERIDICHE NELLE DIVERSE CONDIZIONI PER I DUE GRUPPI. Le funzioni rappresentate con linee continue sono delle funzioni Probit.**

Si è utilizzata un'analisi Probit per calcolare i Punti di Eguaglianza Soggettiva (PES), ossia l'ampiezza della rotazione dell'illuminazione corrispondente al valore 0.5 di proporzione di risposte veridiche.

Due soggetti dei venti testati (uno per gruppo) hanno dato risposte corrette in più del 50% dei trial in ogni condizione sperimentale (in altre parole, le risposte non erano mai affette da *bias*). Per questi soggetti, l'ampiezza dei PES risultava maggiore del range che la variabile indipendente può assumere, per cui questi dati sono stati omessi nell'analisi successiva.

Un t-test sui PES rimanenti ha rivelato una differenza significativa tra i due gruppi identificati dalla variabile indipendente between PROFONDITÀ ( $t(16)=1.889, p<0.05$ ).

I PES medi risultano essere  $40.525^\circ$  per la superficie PROFONDO e  $23.061^\circ$  per la superficie PIATTO.

---

### Sezione 4.4.3 *Discussione*

Il risultato ottenuto evidenzia il fatto che il PES, tra gli effetti percettivi determinati dalla rotazione della superficie e quelli determinati dalla rotazione dell'illuminante, è dipendente dalla profondità della superficie simulata, diminuendo con profondità inferiori. In queste condizioni è possibile affermare che, per i soli soggetti che esperiscono il fenomeno, il *bias* della direzione percepita di rotazione rilevata negli esperimenti precedenti può essere determinato con una rotazione dell'illuminante in controfase di soli 23°.

Le risposte evidenziano che la percezione dell'orientamento globale della superficie è influenzato dalla quantità di rotazione dell'illuminante. Con spostamenti contenuti le risposte risultano veridiche, con spostamenti ampi si registra lo stesso *bias* dell'esperimento 1. Questo indica che l'interpretazione data dal sistema percettivo si basa su due sorgenti informative diverse che, in condizione di rotazione in controfase, competono nella determinazione di una percezione univoca.

- L'informazione sulla posizione finale dovuta alla rotazione della superficie è dipendente dalla profondità dei corrugamenti. Aumentando l'ampiezza dei *bump* e la quantità di rotazione, si potrebbe arrivare a una condizione in cui si verifica occlusione di alcune parti della superficie e ciò indurrebbe presumibilmente una percezione veridica, qualsiasi sia l'ampiezza del movimento dell'illuminante.
- L'informazione dovuta allo spostamento della sorgente luminosa attorno all'oggetto induce una percezione che risulta dipendente solo da questa rotazione, e quindi indipendente dalla reale rotazione dell'oggetto.

## **Paragrafo 4.5    Esperimento 4**

Gli esperimenti esposti in precedenza sono stati effettuati simulando delle superfici in movimento. È stato provato che nelle condizioni esaminate la rotazione dell'illuminante determina una percezione dell'orientamento globale che è affetta da un *bias* nella direzione di illuminazione. Tuttavia, la dinamicità della stimolazione era dovuta sia alla rotazione della sorgente luminosa, sia alla rotazione dell'oggetto. Tramite questo esperimento si è voluto analizzare il comportamento del sistema percettivo con superficie fisicamente stazionaria. In questo modo si è potuto verificare che il *bias* è effettivamente dovuto alla sola variazione della direzione di illuminazione. È stata prevista, infatti, una condizione di stimolazione dinamica, come nell'esperimento 1, e una statica, come nell'esperimento 2.

La superficie è sempre stata simulata con orientamento globale coincidente alla linea dello sguardo, e quindi, se non ci fossero *bias*, i soggetti avrebbero dovuto rispondere di vedere una superficie con orientamento frontale. Ci si aspettava, invece, che in condizione di illuminazione dinamica i soggetti percepissero ruotare la superficie nello stesso verso dell'illuminante, e in condizione statica potessero effettivamente stimare correttamente l'orientamento.

Inoltre, è stata prevista una condizione per verificare se il pattern di risposte rilevato negli esperimenti precedenti non fosse dovuto alla presenza di ombre portate. Per questa condizione, infatti, il pattern di ombreggiatura è stato determinato unicamente dall'orientamento locale della superficie, senza prevedere *cast-shadow*, ma solamente ombre proprie (Domini e Caudek, 1996). Anche se questa situazione è fisicamente impossibile (i raggi di luce dovrebbero in qualche modo attraversare l'oggetto che comunque presenta un comportamento di riflessione come se

fosse opaco), essa permette di comprendere se il *bias* è attribuibile a questa componente fotometrica di formazione dell'immagine.

### **Sezione 4.5.1 Metodo**

Sono stati testati 6 soggetti, 4 volte per le 18 combinazioni delle tre variabili indipendenti:

- STIMOLAZIONE: STATICA e MOVIMENTO. Nella condizione movimento la sorgente luminosa compiva una rotazione di un'ampiezza determinata dalla variabile rotazione. Nella condizione statica lo stimolo corrispondeva all'ultima frame della condizione movimento, ossia rappresentava la superficie illuminata lateralmente.
- MODELLO di illuminazione: LAMBERTIANO, SENZA *cast-shadow* e SPECULARE.
- ROTAZIONE dell'illuminante: 20°, 40° e 60°.

Le sequenze ottenute con rotazione di 60° sono state riportate in Figura 61 (le rotazioni minori sono ricavabili dal diagramma considerandone solo la prima parte). In più è stata inserita una condizione di CONTROLLO, nella quale la superficie compiva una rotazione di 15°.

Le altre condizioni sono equivalenti agli esperimenti precedenti.

Le risposte sull'ampiezza dell'orientamento sono state codificate con segno positivo quando risultavano coerenti con il verso dell'illuminazione e negativo altrimenti.

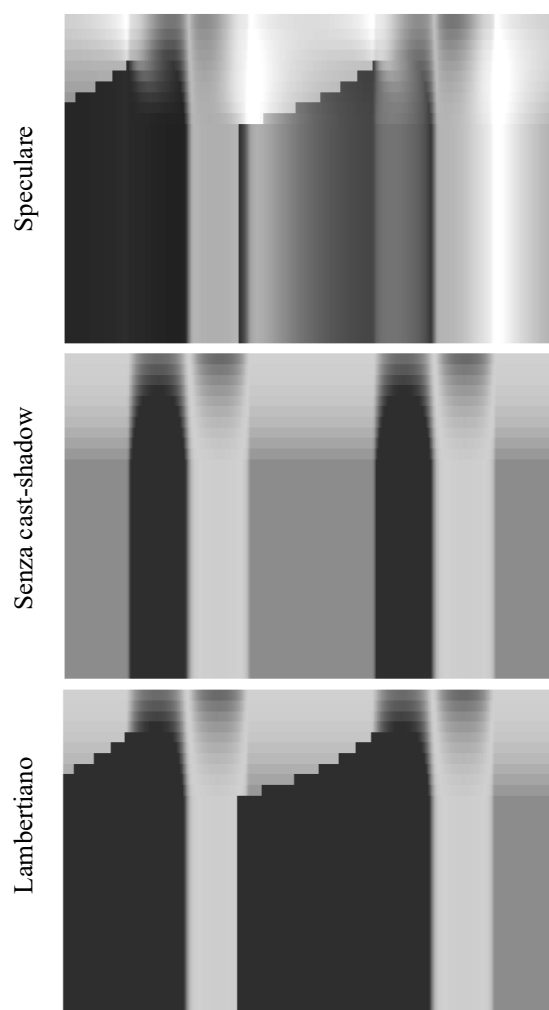


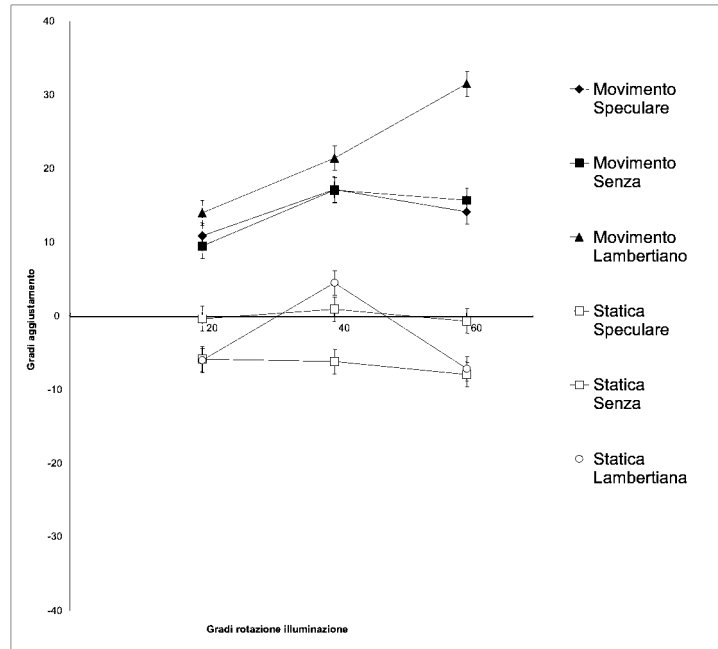
Figura 61: Diagrammi spaziotemporal degli stimoli utilizzati nell'esperimento 4 con rotazione della direzione di illuminazione di  $60^\circ$  a destra. La parte in basso rappresenta lo stimolo in condizione STATICO.

### Sezione 4.5.2 Risultati

I soggetti, interrogati alla fine dell'esperimento, erano consapevoli del fatto che l'illuminazione nella condizione dinamica non fosse stazionaria e che nella condizione statica provenisse da direzioni differenti. Tuttavia, nessuno si è reso conto che la maggior parte degli oggetti simulati aveva un orientamento globale frontale.

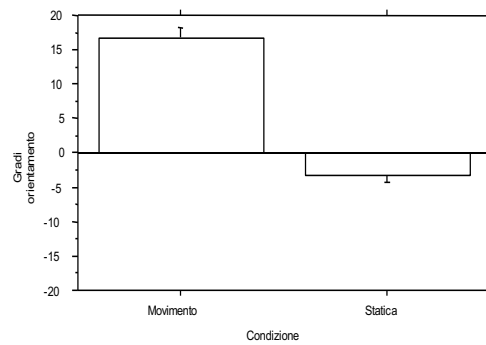
I soggetti hanno riportato di percepire la superficie concava solamente 6 volte con modello LAMBERTIANO, 12 volte con quello SENZA *cast-shadow*, 4 volte con quello SPECULARE su un totale di 432 prove.

Il grafico in Figura 67 evidenzia i risultati ottenuti.



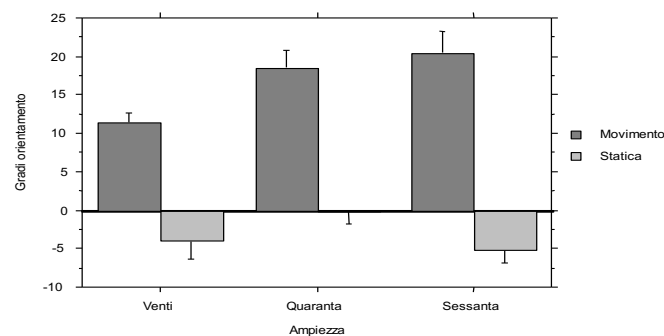
**Figura 62: Orientamento globale percepito nelle varie condizioni sperimentali.**

È stata effettuata un'Anova per misure ripetute sulle risposte di orientamento: STIMOLAZIONE (STATICA, MOVIMENTO)  $\times$  MODELLO (LAMBERTIANO, SENZA, SPECULARE)  $\times$  ROTAZIONE (20°, 40°, 60°). I risultati evidenziano un effetto significativo dei seguenti fattori: STIMOLAZIONE ( $F(1,5)=9.254$ ,  $p<0.05$ ), MODELLO ( $F(2,10)=6.314$ ,  $p<0.05$ ), STIMOLAZIONE-AMPIEZZA ( $F(2,10)=4.035$ ,  $p<0.05$ ) e STIMOLAZIONE-MODELLO-AMPIEZZA ( $F(4,20)=3.893$ ,  $p<0.05$ ). Il fattore AMPIEZZA non risulta significativo ( $F(2,10)=1.634$ , n.s.) e nemmeno le interazioni STIMOLAZIONE-MODELLO ( $F(2,10)=3.417$ , n.s.) e MODELLO-AMPIEZZA ( $F(4,20)=.391$ , n.s.).



**Figura 63: Media orientamenti con stimolazione dinamica e statica.**

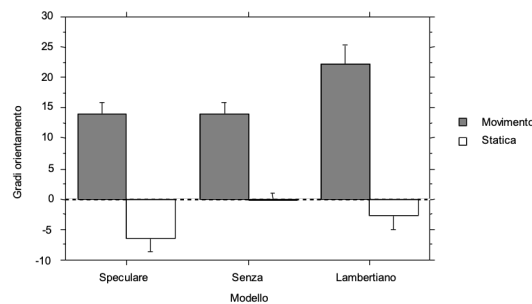
Uno t-test per campione singolo evidenzia che la media delle risposte in condizione statica è significativamente minore di 0 ( $t(53)=-2.299$ ,  $p<0.05$ ) e in condizione dinamica è significativamente maggiore di 0 ( $t(53)=9.012$ ,  $p<0.001$ ). La media delle risposte sull'orientamento globale della superficie con illuminazione in movimento è di  $16.824^\circ$ , mentre con illuminazione stazionaria è di  $-3.192^\circ$ .



**Figura 64: Media orientamenti con diverse ampiezze della rotazione dell'illuminante nei due tipi di stimolazione.**

In condizione STATICA, le risposte ottenute con il modello di illuminazione SPECULARE hanno una media di  $6.639^\circ$  (S.E.  $2.943^\circ$ ), con il modello LAMBERTIANO  $2.889^\circ$  (S.E.  $3.111^\circ$ ) e con il modello SENZA  $0.028^\circ$  (S.E.  $1.517^\circ$ ). Soltanto il valore ottenuto con il modello speculare risulta significativamente diverso da 0 ( $t(17)=2.256$ ,  $p<0.05$ ;  $t(17)=0.926$ , n.s.;  $t(17)=0.018$ , n.s.), vedi Figura 65.





**Figura 65: Media aggiustamenti per i diversi modelli in condizione statica e movimento.**

### Sezione 4.5.3 Discussione

I dati raccolti confermano che l'orientamento globale percepito di una superficie è influenzato dall'illuminazione. In particolare, la direzione di illuminazione, modificando il pattern di luminanze che il soggetto osserva, influenza diversamente la direzione generale di orientamento percepita.

- Un'illuminazione dinamica modifica la forma percepita di una superficie cosicché il soggetto interpreta questa trasformazione come una rotazione dell'oggetto nello stesso verso dell'illuminazione.
- Un'illuminazione statica, invece, ha degli effetti molto minori e che si rispecchiano in un orientamento percepito nel verso opposto a quello dell'illuminazione.

Questi dati dimostrano che il *bias* rilevato in precedenza è attribuibile ad un'interpretazione degli stimoli, da parte del sistema visivo, che si basa presumibilmente su sorgenti informative non efficaci in questa particolare situazione. Gregory (1970, 1980) sostiene che il sistema percettivo genera ipotesi sul mondo scegliendo quella che si verifica più frequentemente. In questo caso, forse il soggetto si basa su qualche meccanismo di detezione di *feature*, le quali non rimangono costanti sulla

superficie: il pattern di luminanza, in condizione dinamica, “scivola” sulla superficie e potrebbe essere interpretato dal sistema visivo con un meccanismo tipo *structure-from-motion*. I risultati raccolti in questa condizione sperimentale, infatti, possono essere spiegati supponendo che il sistema percettivo interpreti le singolarità di primo e terzo tipo descritte da Koenderink (1980, 1982)<sup>28</sup> come se fossero proprietà fisiche e non fotometriche. Entrambe le *feature* si spostano al variare della direzione dell’illuminazione, mentre invece quelle di primo tipo rimangono fisse rispetto alla superficie con cambiamenti del punto di vista.

Il *bias* rilevato è interpretabile supponendo che il sistema percettivo utilizzi delle regole tipo “*brighter is closer*”<sup>29</sup>. Nella Figura 61, infatti, è evidenziato un profilo in cui la parte più chiara si sposta nella direzione di illuminazione (il diagramma relativo al modello LAMBERTIANO risulta più evidente). In condizione statica, se il sistema percettivo interpretasse questa zona ritenendola più vicina, la parte sinistra dovrebbe apparire più distante. Le risposte indicano una rotazione media verso sinistra di circa 3°. In condizione dinamica, invece, la parte centrale del *bump*, che seguendo la regola appare in primo piano, si sposta verso destra e verrebbe interpretato come una rotazione da un meccanismo tipo *structure-from-motion*. Seguendo questa interpretazione, la differenza tra i modelli di illuminazione è attribuibile al contrasto presente nell’immagine.

---

<sup>28</sup> Vedi p. 30 per una trattazione delle invarianti.

<sup>29</sup> Vedi pp. 45-50.

## **Paragrafo 4.6    Esperimento 5**

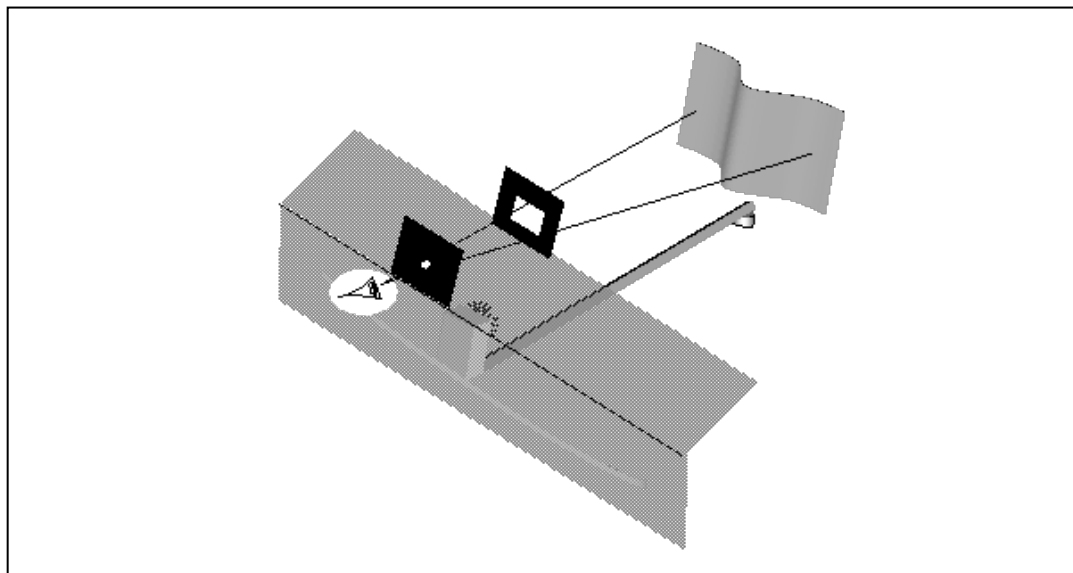
In questo esperimento viene utilizzato un oggetto solido e sono richiesti dei giudizi sull'orientamento in condizioni di illuminazione statica e in movimento. Lo scopo è quello di chiarire se i *bias* trovati con gli esperimenti precedenti si verificano anche con oggetti reali. In altre parole, si intende verificare se il movimento della sorgente luminosa determina anche qui una percezione distorta dell'oggetto. Tale informazione potrebbe essere interpretata anche in questo caso come una rotazione dello stesso.

### **Sezione 4.6.1    Metodo**

Sono stati testati 12 soggetti. È stato costruito un apparato, in cui l'oggetto è visibile soltanto attraverso uno schermo di riduzione. Una lampadina di 10W approssimativamente puntiforme è stata posizionata su un braccio che poteva essere ruotato dallo sperimentatore per un'ampiezza totale di 24°. La distanza della lampadina dall'oggetto è 1m (il fulcro è stato posto sotto l'oggetto). Le pareti della scatola sono scure e la stanza buia. L'oggetto osservato è costituito da una superficie cartacea approssimativamente opaca di 16 cm di larghezza e 7 di altezza. Il foglio è stato modellato in modo che assumesse un profilo convesso, simile ad uno dei due *bump* modellati al computer. Lo stimolo è sempre rimasto stazionario.

Sono state testate due condizioni: una in cui l'illuminazione è STATICA, l'altra in cui è in MOVIMENTO. Nella condizione con movimento della luce, la sorgente di illuminazione viene mossa dallo sperimentatore da

un estremo all'altro per tre volte successive. Nella condizione stazionaria, invece, viene lasciata fissa ad uno dei due estremi (ossia defilato rispetto all'orientamento globale della superficie di  $\pm 12^\circ$ ).



**Figura 66: RAFFIGURAZIONE DELL'APPARATO.**

Prima del test, ai soggetti è stato richiesto di considerare l'oggetto come se fosse convesso, seguendo il paradigma di Todd e Mingolla (1983). In ogni prova dovevano dire:

- se effettivamente vedevano la superficie convessa
- il verso in cui fosse ruotata nella condizione STATICA, oppure il verso di rotazione percepito nella condizione MOVIMENTO. Con stimolazione dinamica veniva, cioè, richiesto di identificare il verso della rotazione nella prima parte del movimento di avanti e indietro.

Sono state raccolte 8 risposte per ogni soggetto in ognuna delle condizioni. Il posizionamento della luce è stato randomizzato ed egualmente distribuito a destra e sinistra. I soggetti osservavano lo stimolo monocolarmente. I soggetti davano la risposta solo dopo che lo stimolo veniva presentato per circa 6 secondi e la lampada spenta.

### Sezione 4.6.2 Risultati

Tutti i soggetti hanno ritenuto l'oggetto sempre convesso, come richiesto all'inizio. Siccome è sempre rimasto fermo, le risposte non possono essere classificate come veridiche o non veridiche; per cui si è provveduto a codificarle come “consistenti” o “inconsistenti” con la direzione di illuminazione, a seconda che l'orientamento percepito della superficie fosse nella direzione dell'illuminazione oppure no.

La proporzione media di risposte consistenti risulta essere 0.71 per la condizione MOVIMENTO e 0.41 per quella STATICA. Nella condizione STATICA le risposte “consistenti” non differiscono significativamente dal caso ( $t(11)=-.987$ , n.s.), come indicato nella Figura 67. Un  $t$ -test per campioni appaiati rivela una differenza significativa tra le due condizioni ( $t(11)=3.252$ ,  $p<0.01$ ).

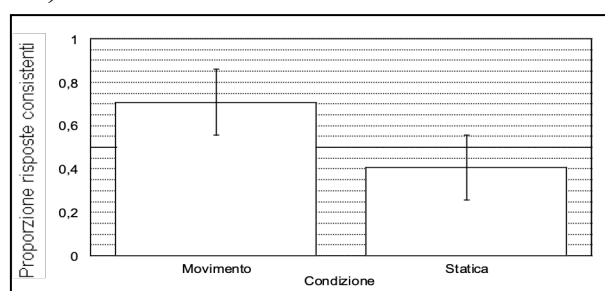


Figura 67: Risposte consistenti con il verso della posizione finale della sorgente nelle due condizioni di stimolazione.

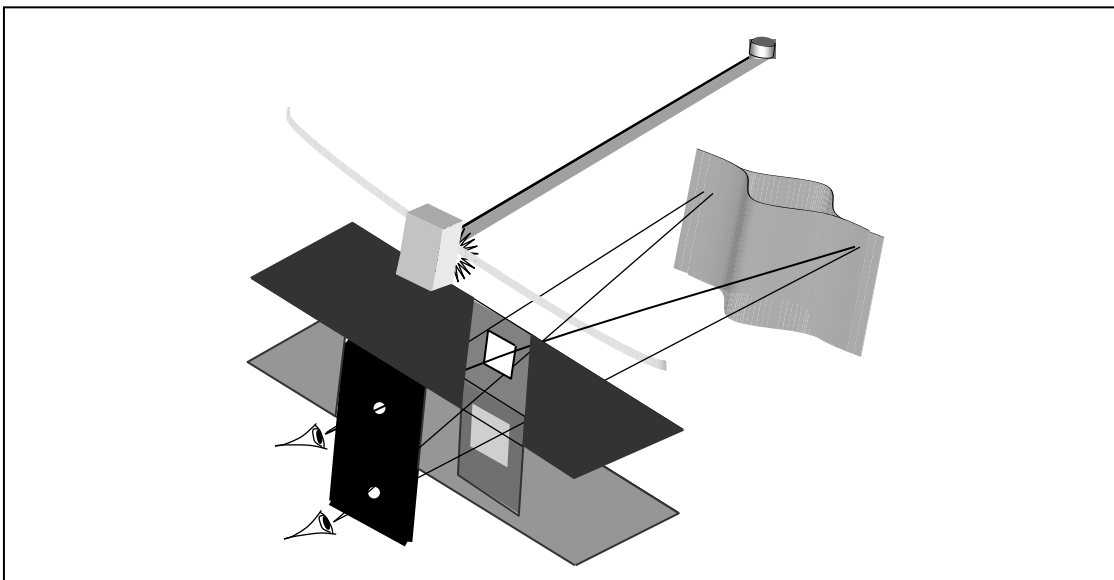
### Sezione 4.6.3 Discussione

In accordo con i dati raccolti negli esperimenti precedenti, i soggetti riportano una rotazione della superficie nello stesso verso della direzione di illuminazione con illuminazioni dinamiche, mentre non sono affetti da *bias* con illuminazione stazionaria. Ciò indica che il *bias* registrato con immagini generate al computer si verifica anche con oggetti reali (vedi anche Johnston e Curran, 1996) e che la simulazione ha gli stessi effetti percettivi delle analoghe situazioni reali.

## **Paragrafo 4.7    Esperimento 6**

Con questo esperimento si vuole esaminare la differenza nella prestazione di riconoscimento di un pattern ambiguo con osservazione attiva e passiva. Nella letteratura, infatti, è stato dimostrato che l'informazione sulla posizione della sorgente luminosa può essere cruciale nella determinazione della forma degli oggetti (ad esempio Erens, Kappers e Koenderink, 1993; Horn 1970, Curran e Johnston, 1995).

In questo caso si vuole fornire l'informazione relativa alla direzione di illuminazione ad uno solo dei due soggetti che osservano lo stesso stimolo, costituito da una superficie analoga a quella del precedente esperimento 5, ma il cui verso della convessità può essere invertito (vedi Figura 68).



**Figura 68: Apparato utilizzato nell'esperimento 6.**

La conoscenza della posizione della sorgente luminosa dovrebbe permettere l'esatta interpretazione del pattern di luminanze visibile, fornendo le basi per l'identificazione della concavità/convessità della

superficie. Il soggetto che non ha a disposizione questa possibilità potrebbe rispondere in due modi.

- A) Potrebbe rispondere sempre a caso, data l'ambiguità della sorgente informativa, se si basasse esclusivamente sul pattern. Ciò significherebbe che il sistema percettivo non è vincolato nell'interpretazione dello stimolo, ossia non assume una forma specifica degli oggetti.
- B) Potrebbe rispondere sempre concavo oppure convesso, se il sistema visivo si basa su assunzioni a priori nell'interpretazione degli stimoli (ad esempio Von Fieandt, 1938; Langer e Bülthoff, 2000, sostengono che usi l'assunzione che gli oggetti siano convessi, Ramachandran, 1988a, afferma che le concavità sono le unità standard del sistema percettivo).

### **Sezione 4.7.1 Metodo**

Sono stati testati 6 coppie di soggetti assegnati a caso al gruppo ATTIVO (che spostava la sorgente luminosa) e PASSIVO. L'apparato è simile a quello dell'esperimento 5, con le modifiche visibili nella Figura 68.

Sono stati presentate 4 superfici costituite da una superficie cartacea di colore grigio approssimativamente opaca poste su un supporto quadrato di 25 cm di lato. Le superfici, con altezza di 21 cm, sono state realizzate piegando i fogli in modo che corrispondessero con il supporto. Le quattro superfici avevano una lunghezza (quando non fissate) e una profondità riassunte nella seguente tabella.

	Lunghezza	Profondità
1	27.5 cm	5.5 cm
2	31.0 cm	8.5 cm
3	34.5 cm	10.5 cm
4	38.0 cm	12.5 cm

Il foglio poteva essere presentato con il rilievo verso l'osservatore (CONVESSO) oppure dalla parte opposta (CONCAVO). La superficie è rimasta stazionaria durante la presentazione.

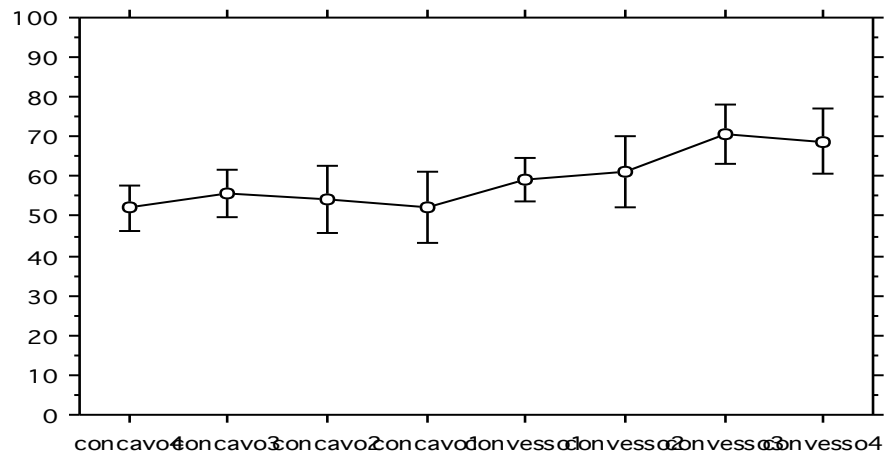
La luce posta sul braccio veniva accesa dopo che il soggetto ATTIVO aveva iniziato a muoverla a destra e a sinistra per un'ampiezza totale di  $48^\circ$  e veniva spenta dopo 7 sec. Il compito era di determinare il verso della concavità scrivendolo su un foglio posto accanto all'apparato. Sono state richiesti 4 giudizi per ognuna delle 8 condizioni casualizzate: una concavo e una convesso per ognuna delle 4 superfici.

### **Sezione 4.7.2 Risultati**

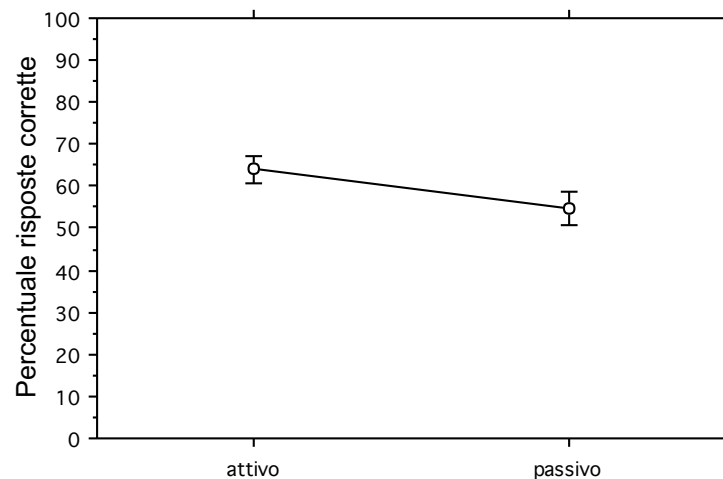
Come nel caso dell'esperimento 2, il compito affidato non è semplice. Spesso, durante alcune prove che hanno preceduto l'esperimento, i soggetti affermavano che le loro risposte sarebbero state casuali, perché erano incapaci di ricavare facilmente il verso della convessità.

Sui dati raccolti è stata calcolata un'Anova 1 within (SUPERFICIE: CONCAVO4, CONCAVO3, CONCAVO2, CONCAVO1, CONVESSO1, CONVESSO2, CONVESSO3, CONVESSO4) x 1 between (GRUPPO: ATTIVO, PASSIVO), che non ha evidenziato differenze significative tra i due gruppi (GRUPPO  $F(1,10)=2.403$ , n.s.), né per le diverse superfici ( $F(7,70)=0.460$ , n.s.), né nell'interazione ( $F(7,70)=0.597$ , n.s.). I seguenti grafici rappresentano i risultati ottenuti. La leggera differenza (non significativa) della prestazione con i diversi stimoli rappresentata in Figura 69 ha evidenziato una possibile influenza della direzione della concavità che è così stata analizzata.



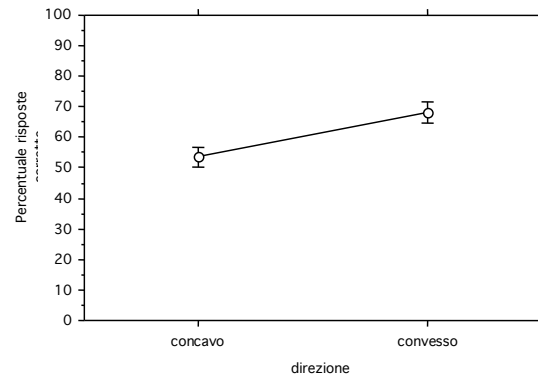


**Figura 69: Risposte corrette con i diversi stimoli.**

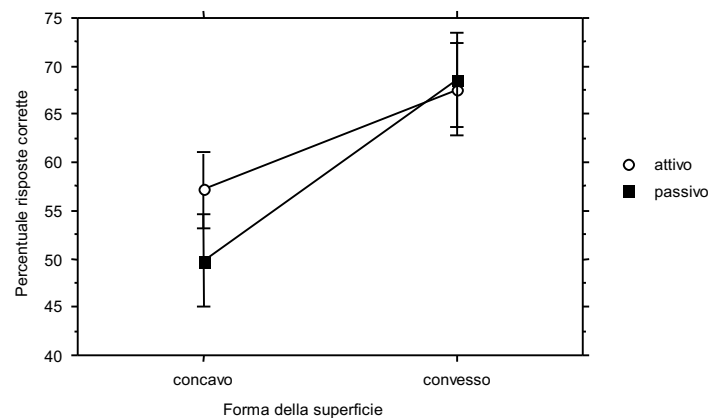


**Figura 70: Risposte corrette per i diversi stimoli suddivise per i due gruppi.**

Un'Anova 1 within (gruppo: ATTIVO, PASSIVO) x 1 between (CONCAVO, CONVESSO), ha messo in evidenza una diversa prestazione dei soggetti per il senso della CONCAVITÀ ( $F(1,10)=5.301$ ,  $p<0.05$ ), ma non ha rilevato differenza tra i due gruppi ( $F(1,10)=2.403$ , n.s.), né nell'interazione ( $F(1)=0.139$ , n.s.). La significatività del fattore della concavità/convessità potrebbe essere interpretata come effettiva superiorità del soggetto oppure come *bias* per lo stimolo convesso.

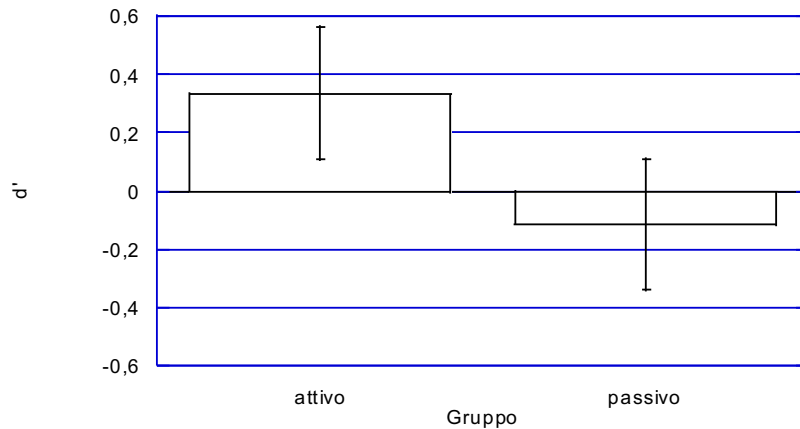


**Figura 71: Proporzione risposte corrette con superficie concava e convessa.**



**Figura 72: Percentuale risposte corrette suddivise per gruppo e verso della concavità.**

Per comprendere la differenza nella prestazione con stimoli concavi e convessi è stata eseguita un'analisi della sensibilità seguendo la SDT (Macmillan e Creelman, 1991) raggruppando i dati ricavati secondo il verso della concavità. È stato calcolato il  $d'$  seguendo il modello yes-no, considerando come S+N la CONCAVITÀ della superficie. I valori ottenuti sono  $d'_{attivo}=0.336$ ,  $d'_{passivo}=-0.113$ . I due valori differiscono significativamente ( $t(11)=2.304$ ,  $p<0.05$ ). Inoltre, mentre quello passivo non si differenzia da 0 ( $t(5)=1.113$ , n.s.), quello attivo lo è ( $t(5)=3.603$ ,  $p<0.05$ ), vedi Figura 73.



**Figura 73:  $d'$  CALCOLATO PER I DUE GRUPPI.**

Vi sono evidenti *bias* nelle risposte,  $\log(b)_{\text{attivo}}=1.713$ ,  $\log(b)_{\text{passivo}}=1.734$ , entrambi significativi ( $t(5)=2.752$ ,  $p<0.05$ ;  $t(5)=2.843$ ,  $p<0.05$ ). Il criterio di entrambi i gruppi è conservativo,  $c_{\text{attivo}}=0.700$ ,  $c_{\text{passivo}}=0.697$ , entrambi significativi ( $t(5)=2.647$ ,  $p<0.05$ ;  $t(5)=2.680$ ,  $p<0.05$ ). Entrambi questi indici non differiscono tra i due gruppi ( $t(10)=0.960$ , n.s.;  $t(10)=0.956$ , n.s.)

### Sezione 4.7.3 Discussione

I dati raccolti nell'esperimento evidenziano una tendenza del sistema percettivo nell'interpretare gli stimoli come convessi (Von Fieandt, 1938). Le risposte "convesso", infatti, sono significativamente più frequenti per entrambi i gruppi ( $\log(b)>1$ ). Inoltre gli errori più frequenti sono il mancato riconoscimento della forma concava, piuttosto che di quella convessa. Ciò indicherebbe che il sistema percettivo assuma che il pattern di *shading* sia determinato da oggetti convessi, forse anche a causa delle elevate autoriflessione che si verificano con stimoli concavi. Ciò potrebbe infatti causare una elevata quantità di illuminazione passiva che ridurrebbe l'informazione relativa all'orientamento locale delle superfici.

L'analisi della sensibilità ha inoltre rilevato una differenza nella prestazione dei due gruppi. Tale differenza è presumibilmente dovuta alla

---

sola stimolazione con oggetti concavi (vedi Figura 72). Se il sistema percettivo assumesse che gli oggetti fossero convessi, infatti, con un oggetto convesso non si avrebbe nessun miglioramento della prestazione. Ciò dimostra, quindi, l'efficacia della conoscenza della direzione d'illuminazione sull'interpretazione dello *shading* in condizione dinamica.

## **Paragrafo 4.8 Conclusioni**

In questo lavoro si è voluto esaminare l'influenza della direzione di illuminazione sulla forma percepita di una superficie *smooth* senza bordi visibili. Gli esperimenti sono stati condotti sia con illuminazioni statiche che dinamiche. In alcuni esperimenti è stata simulata la rotazione della superficie e lo spostamento dell'illuminante.

### ***Illuminazione statica***

Con direzione di illuminazione statica e coincidente con la linea dello sguardo, le risposte collezionate negli esperimenti 1 e 2 evidenziano un miglioramento della prestazione nel riconoscimento dell'orientamento di una superficie quando questa ruota, piuttosto che quando rimane stazionaria. I risultati ottenuti sono in accordo con quelli di Norman, Todd e Phillips (1996); Koenderink, Kappers, Todd, Norman e Phillips (1996); Erens, Kappers e Koenderink (1993a); Domini e Caudek (1996).

Ciò significa che l'ambiguità nell'interpretazione dell'informazione apportata dal chiaroscuro può essere risolta mediante uno spostamento dell'oggetto in rapporto all'illuminazione e al soggetto. L'effetto fotometrico del movimento risulta un *cue* importante nella determinazione della forma percepita (Pentland, 1991).

La modificazione del pattern di *shading* in questo caso, quindi, può essere correttamente interpretata dal sistema percettivo per la determinazione della forma della superficie. Ciò dimostra che questa sorgente informativa è potenzialmente analizzabile dal sistema percettivo. Ciò è presumibilmente dovuto alla regolarità con cui sono determinate le modifiche nel flusso ottico (Gregory, 1970), sottoposte a vincoli fisici che potrebbero essere stati colti e internalizzati dal sistema percettivo (Shepard, 1984).

---

**Influenza dell'illuminazione**

I risultati raccolti con illuminazioni non coincidenti con la linea dello sguardo indicano, invece, una diversa influenza della direzione di illuminazione in condizioni statiche e dinamiche.

- Con sorgente di illuminazione statica, si è registrata una modesta influenza della direzione di illuminazione sulla percezione dell'orientamento globale. La forma percepita risulta orientata di circa 5° nel verso opposto a quello di illuminazione quando sono presenti ombre proiettate ed il modello di illuminazione prevede illuminazione passiva, mentre risulta veridica senza di esse (Esperimento 4). Se l'oggetto non è frontale, l'orientamento globale della superficie viene stimato nel verso corretto (Esperimento 2).
- Con illuminazione in movimento, invece, la forma percepita è affetta da un *bias* nella direzione della sorgente luminosa. Con superfici statiche ciò viene interpretato come rotazione della superficie con verso coerente a quello dell'illuminante primario. Con superfici in rotazione, la direzione del movimento dell'illuminazione influenza il verso percepito. In particolare, con rotazioni opposte superficie-sorgente, la superficie appare ruotare nella stessa direzione dell'illuminazione, anche se veniva simulata nel verso opposto. Con rotazioni coerenti, la direzione percepita risulta veridica, ma la quantità di rotazione risulta maggiore di quella simulata.

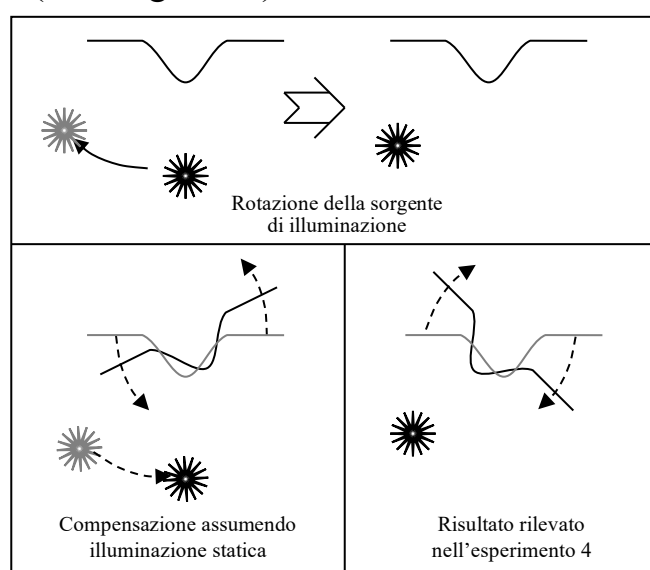
Questi risultati confermano ed ampliano le osservazioni di Domini e Caudek (1996).

**Ipotesi di spiegazione**

Per spiegare i risultati ottenuti con illuminazione dinamica si può supporre che il sistema percettivo assuma che l'illuminante rimanga stazionario (ad esempio Kersten, Mamassian e Knill, 1997) oppure che la scena sia illuminata dalla stessa direzione di osservazione. Queste ipotesi sono legate al fatto che nell'interazione che abbiamo con l'ambiente che ci circonda gli oggetti si muovono con una velocità maggiore delle sorgenti di

illuminazione (ad esempio Ramachandran, 1988b). L'interpretazione che il sistema dà alle stimolazioni, quindi, potrebbe essere dipendente dal vincolo di un'illuminazione statica, visto che è la condizione più frequente in natura (ad esempio Gregory, 1970; Shepard, 1984).

I risultati ottenuti non supportano queste idee. Infatti, con superficie statica e illuminazione in movimento, la regola della sorgente statica prevederebbe una percezione dell'orientamento globale con verso contrario alla direzione del movimento dell'illuminazione, mentre i dati evidenziano risposte opposte (vedi Figura 74).



**Figura 74:** Ipotesi dell'assunzione dell'illuminante statico e risultati ottenuti.

Un altro modo per interpretare i risultati raccolti è attraverso la logica dello *depth-from-motion* o *structure-from-motion*.

Analizzando i diagrammi spazio-temporali degli stimoli degli esperimenti 1 e 3, infatti, si può notare che dal primo all'ultimo frame ci sono delle *feature* che si spostano in maniera coerente a quella dell'illuminazione, qualsiasi sia il verso di rotazione della superficie. Supponendo che il sistema percettivo utilizzi tali *feature* (come ad esempio gli invarianti di primo e terzo tipo di Koenderink, 1980, 1982), il fatto che essi si spostino potrebbe modificare in qualche modo la forma percepita. Se tali pattern non fossero riconosciuti correttamente o non venissero tenute presenti le proprietà fotometriche ad esse associate (il fatto che si spostino

al variare della direzione di illuminazione e che quelle di primo tipo rimangano fisse rispetto alla superficie per variazioni del punto di osservazione) si avrebbe un'interpretazione erranea degli stimoli. In altre parole il sistema percettivo considererebbe tali *feature* non come invarianti fotometriche ma fisiche, assumendo che siano “incollate” alla superficie. Di conseguenza, il loro spostamento verrebbe interpretato come uno spostamento relativo delle parti (vedi Figura 75) e quindi risulterebbe in un oggetto percepito ruotare.

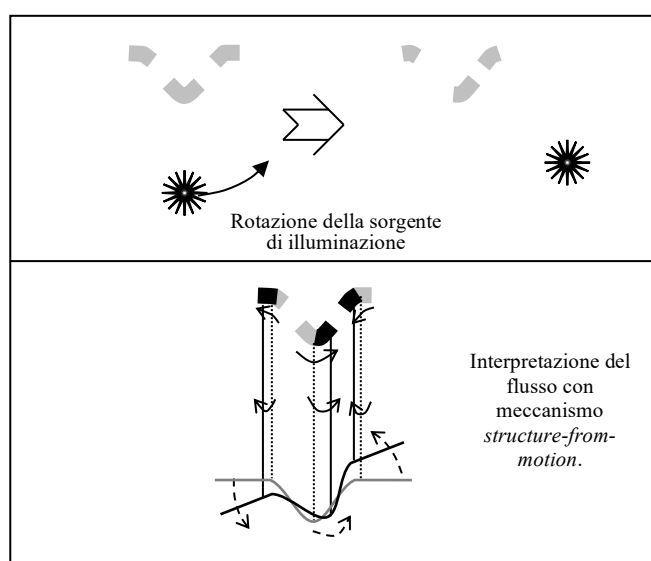


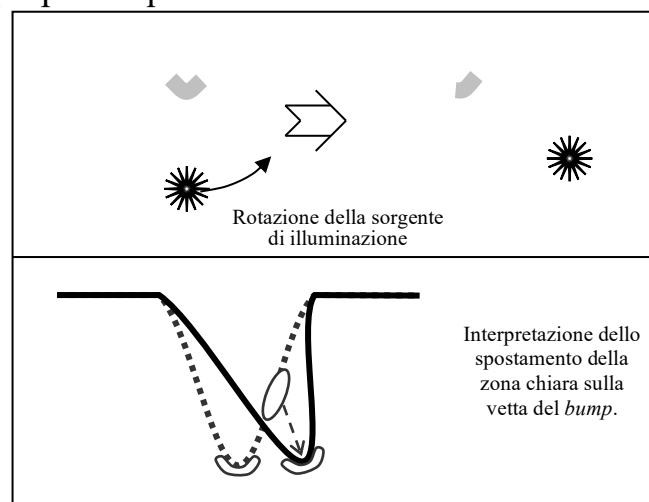
Figura 75: Ipotesi di interpretazione degli invarianti.

Un'altra possibilità di spiegazione viene offerta dall'euristica “*brighter is closer*” (ad esempio Egusa, 1983; Schwartz e Sperling, 1983; Pentland, 1989) o dall'assunzione di una illuminazione diffusa (Nicolaidis, 1941; Langer e Bülthoff, 1999; Langer e Zucker, 1994). In modo simile a quanto ipotizzato per gli invarianti, il fatto che la punta del *bump* sia più chiara verrebbe interpretato come un indice della vicinanza della zona centrale. Con illuminazione statica e sfiancata, la diversa localizzazione della zona verrebbe semplicemente interpretata come una traslazione della superficie sul piano-immagine. Il diverso risultato ottenuto nell'esperimento 4 con modello di illuminazione speculare potrebbe essere dovuto al caso, oppure essere interpretato considerando che il profilo di luminanza presenta un andamento più complesso, con una zona scura a



sinistra del vertice del *bump* e una zona relativamente più chiara alla base destra. In condizione dinamica, invece, lo spostamento della zona più chiara potrebbe essere considerato uno spostamento della parte della superficie in primo piano nella stessa direzione della sorgente di illuminazione. Forse il meccanismo sottostante a questa interpretazione potrebbe essere lo stesso dell'analisi degli invarianti proposta da Koenderink (1980) ed esposta sopra.

L'interpretazione con l'euristica "*brighter is closer*" non risulta applicabile alla superficie simulata con metodi fisicamente più realistici: con i modelli che prevedono l'illuminazione passiva il vertice dei *bump* non è la parte più chiara della figura. Alla base delle due protuberanze, infatti, l'illuminazione totale è data sia dalla sorgente primaria che dalla riflessione sulle zone vicine. In questo caso, supponendo un'analisi percettiva basata soltanto sulla luminanza, la forma percepita dell'oggetto non corrisponderebbe a quella simulata. L'unica possibilità per mantenere questa ipotesi è che il sistema percettivo possa riconoscere le aree con illuminazione passiva e consideri la quota aggiuntiva di illuminazione. Osservando la Figura 61, si può notare come le zone alla base dei *bump* abbiano un'apparenza fenomenica simile a una "nebbia". Ciò potrebbe essere dovuto proprio a questo meccanismo.



**Figura 76:** Ipotesi di spiegazione mediante l'euristica "*brighter is closer*".

---

**Oggetti solidi**

Il *bias* sulla percezione della forma in funzione dell'illuminazione non è dovuto alla simulazione al computer. Stimoli simili a quelli simulati al computer hanno infatti evocato risposte analoghe. Questo risultato è una conferma di quello ottenuto da Johnston e Curran (1996), i quali dimostravano che stimoli solidi e simulati determinano lo stesso pattern di risposte.

Un altro risultato ottenuto nella ricerca è una conferma che il sistema percettivo assuma che gli oggetti abbiano una forma globalmente convessa (Von Fieandt, 1938; Langer e Bülthoff, 2000) e abbia maggiore difficoltà nell'interpretare lo shading dinamico quando è dovuto a oggetti concavi.

**Osservazione attiva**

Con oggetti concavi, la conoscenza della posizione istantanea della sorgente luminosa permette di migliorare la prestazione di riconoscimento della forma. In altre parole, una sorgente di informazione ambigua determinata dall'illuminazione in movimento può essere interpretata in modo più corretto conoscendo la posizione dell'illuminazione. I risultati ottenuti suggeriscono che l'intervento attivo sullo stimolo produce una prestazione percettiva più vicina allo stimolo fisico. Questo dato è in accordo col ciclo percezione-azione gibsoniano, in base al quale il risultato percettivo è influenzato dall'intervento attivo dell'osservatore sul pattern dell'array ottico.

Ciò fa pensare che il bias delle risposte negli esperimenti 1, 3 e 4 sia dovuto ad una stima erronea della posizione dell'illuminante. Stima che, potenzialmente, sarebbe possibile correggere fornendo una informazione analoga a quella disponibile ai soggetti attivi dell'esperimento 5.

### Sezione 4.8.1 Prospettive e sviluppi

Il lavoro presentato ha permesso di delineare molte caratteristiche dell'influenza dell'illuminazione dinamica sulla percezione della forma degli oggetti. Tuttavia, non sono state esaminate molte variabili che, potenzialmente, potrebbero essere importanti in quest'ambito.

Ad esempio non è stata presa in considerazione la velocità di spostamento della sorgente di illuminazione e della superficie. Infatti, in un esperimento non riportato è stato evidenziato che velocità esigue non determinano il *bias* riscontrato.

Un'altra fonte informativa importante potrebbe essere la funzione di velocità istantanea della sorgente luminosa e del momento di rotazione della superficie. Negli esperimenti, infatti, l'accelerazione impressa all'inizio della sequenza è infinità (il movimento è del tipo tutto-nulla). Nella realtà fisica gli oggetti hanno una massa e quindi anche un'inerzia e quindi la loro velocità non può cambiare istantaneamente.

Un'altra possibilità è di esaminare se il *bias* sia presente anche con superfici in cui siano visibili bordi e/o spigoli, oppure con superfici texturate. Molti studiosi hanno infatti testato l'interazione tra diverse fonti informative. Anche in questo caso diversi *cue* potrebbero interagire in maniera simile a quella esaminata nel primo esperimento, dove venivano contrapposti spostamento dell'illuminante e rotazione dell'oggetto.

Il tipo di compito utilizzato negli esperimenti non prevede la determinazione della percezione della forma locale della superficie. Una misurazione che potrebbe aiutare a comprendere quali siano effettivamente i meccanismi coinvolti nelle situazioni testate sarebbe quello di utilizzare delle tecniche di *probing locale*.

Infine, un altro fattore che potrebbe essere implicato nel processo di analisi dell'informazione dovuta all'illuminazione dinamica è l'apprendimento percettivo. In questo caso non sono state condotte delle prove, ma dopo aver costruito più di un motore di *rendering* e dopo essermi sottoposto a molti dei test che poi avrebbero eseguito i soggetti, mi sono reso conto in prima persona di non essere più affetto dal *bias* che stavo analizzando e al quale all'inizio ero soggetto.

## ***Bibliografia***

- Adelson E.H., Bergen J.R., 1985. *Spatiotemporal energy models for the perception of motion*, Journal of the Optical Society of America, A 2, pp. 284-299.
- Adelson E.H., Pentland A.P., 1996. *The perception of shading and reflectance*, in Knill D.G. Richards W., Knill D. Richards W. (eds) *Perception as a bayesian inference*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 409-423.
- Adelson E.H., 1991. *Mechanisms for motion perception*, Optics & Photonics News, August, pp. 24-30.
- Arnheim R., 1954. *Art and visual perception*, Berkeley, University of California Press.
- Attneave F., 1954. *Some informational aspects of visual perception*. *Psychological Review*, V 61, pp. 183 – 193.
- Attneave F., 1982. *Pregnanz and Soap Bubble System: a theoretical exploration*. In Beck J. (Ed.), 1982, *Organization and representation in perception*, Hillsdale, New York, Erlbaum.
- Baxandall, 1995. *Shadow and enlightenment*, London, Yale University Press.
- Barrow H.G. e Tenenbaum J.M., 1978. *Recovering intrinsic scene characteristics from images*. In Hanson A.R. e Riseman E.M. (Ed.), 1999, *Computer Vision systems*, London, Academic Press, pp. 3-26.
- Barrow H.G. e Tenenbaum J.M., 1981. *Interpreting line drawings as three-dimensional surfaces*. *Artificial Intelligence*, V 17, pp. 75-116.
- Beck J., 1972. *Similarity grouping and peripheral discriminability under uncertain*, *American journal of psychology*, V 85, pp. 11-19.
- Beck J., 1972. *La percezione del colore delle superfici*, *Le Scienze*, N 62, pp. 106-114.

- Benson C., Yonas A., 1973. *Development of sensitivity to static pictorial information*, Perception & psychophysics, V 13 N 3, pp. 361-366.
- Berbaum K., Bever T., Chung C., 1984. *Extending the perception of shape from known to unknown shading*, Perception, V 13, pp. 479-488.
- Berbaum K., Bever T., Chung C., 1983. *Light source position in the perception of object shape*, Perception, V 12, pp. 411-416.
- Blake A., Bülthoff H.H., 1990. *Does the brain know the physics of specular reflection?*, Nature, V 343, pp. 165-168.
- Blake A., Bülthoff H.H., 1991. *Shape from specularities: computation and psychophysics*, Philosophical transaction of the royal society of London, V 331, pp. 237-252.
- Blake A., Zisserman A., Knowles G., 1985. *Surface descriptions from stereo and shading*, Image and vision computing, V 3, pp. 183-191.
- Bloj M.G., Kersten D., Hurlbert A.C., 1999. *Perception of three-dimensional shape influences colour perception through mutual illumination*, Nature, V 402, pp. 877-879.
- Braje W.L., Legge G.E., Kersten D., 2000. *Invariant recognition of natural object in the presence of shadows*, Perception, in press.
- Braun J., 1993. *Shape-from-shading is independent of visual attention and may be a 'texton'*, Spatial Vision, V 7 N 4, pp. 311-322.
- Brewster D., 1826. *On the Optical Illusion of the Conversion of Cameos into Intaglios*, Edinburgh Journal of Science, V 4, pp. 99-108.
- Brooks M.J., Horn B.K.P., 1985. *Shape and Source from Shading*, AI memo, N 820, MIT LAB.
- Bruss A.R., 1985. *The Eikonal Equation: Some Results Applicable to Computer Vision*, in Horn B.K.P. e Brooks M.J., *Shape from shading*, Cambridge, MA, MIT Press.
- Bülthoff H.H., Mallot H.A., 1988. *Integration of depth modules: stereo and shading*, Journal of the optical society of America, A 5, pp. 1749-1758.
- Burigana L., 1999. *From optical to visual relational constraints*, Milano, Guerini Studio.

- Cavanagh P., Leclerc Y.G., 1989. *Shape from shadows*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 15 N 1, pp. 3-27.
- Cavanagh P., Shioiri S., MacLeod D.I.A., 1987. *Is the achromatic form pathway based on luminance or brightness?*, Investigative Ophthalmology, V 28, pp. 362-378.
- Christou C., Koenderink J.J., 1997. *Light source dependence in shape from shading*, Vision Research, V 37 N 11, pp. 1411-1449.
- Christou C., Koenderink J.J., van Doorn A.J., 1996. *Surface gradients, contours and the perception of surface attitude in images of complex scenes*, Perception, V 25, pp. 701-713.
- Cott H.B., 1941. *Adaptive coloration in animals*, New York, Oxford.
- Curran W., Johnston A., 1994a. *Integrating of shading and texture cues: testing the linear model*, Vision Research, V 34 N 14, pp. 1863-1874.
- Curran W., Johnston A., 1994b. *Investigate three-dimensional curvature contrast*, Perception, V 23 suppl.
- Curran W., Johnston A., 1996. *The effect of illuminant position on perceived curvature*, Vision Research, V 36 N 10, pp. 1399-1410.
- Curran W., Johnston A., 1995. *Can 3D curvature contrast be explained in terms of the simultaneous contrast effect?*, Perception, V 24 supplement.
- Curran W., Johnston A., 1996. *The effect of light source position on perceived curvature*, Vision Research, V 36, pp. 1339-1410.
- Cutting J.E., 1984. *Reflections on surfaces: Across disciplinary replay to Stevens*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 113 N 2, pp. 221-224.
- Cutting J.E., Millard R.T., 1984. *Three gradients and the perception of flat and curved surfaces*, Journal of experimental psychophysics, General, V 113, pp. 198-216.
- De Haan E., Erens R.G.F., Noest A.J., 1995. *Shape from shaded random surfaces*, Vision Research, V 35 N 21, pp. 2985-3001.

- de Oliviera Neto M.M., Bishop G., 1998. *Dynamic Shading in Image-based rendering*, Technical report, University of north Carolina, Department of Computer science.
- Deshpande S.G., Chaudhuri, 1998. *Recursive estimation of illuminant motion*, Indian institute of technology, Bombay. Departement of electrical eng., Technical Report.
- Domini F., Caudek C., 1996. *Illusory 3D rotation induced by a moving illuminant source*, 37 meet of the Psychonomic Society, Chicago Illinois, 31 Ott - 3 Nov.
- Dosher B.A., Sperling G., Wurst S., 1986. *Tradeoffs between stereopsis and proximity-luminance covariance as determinant of perceptual 3D structure*, Vision Research, V 26 N 6, pp. 973-990.
- Egusa H., 1983. *The effect of brightness, hue and saturation on perceived depth between adjacent regions in the visual field*, Perception, V 12, pp. 167-175.
- Erens R.G.F., Kappers A.M.L., Koenderink J.J., 1993a. *Estimating local shape from shading in the presence of global shading*, Perception & psychophysics, V 54 N 3, pp. 334-342.
- Erens R.G.F., Kappers A.M.L., Koenderink J.J., 1993b. *Perception of local shape from shading*, Perception & psychophysics, V 54 N 2, pp. 145-156.
- Farnè M., 1973. *La tendenza alla terza dimensione*, Le scienze, N 62, pp. 99-105.
- Ferguson G.P., Messenger J.B., Budelmann B.U., 1994. *Gravity and light influence the countershading reflexes of the cuttlerfish Sepia Officinalis*, Journal of experimental biology, 191, pp. 247-256.
- Flock H.R., 1965. *Optical texture and linear perspective as stimuli for slant perception*, Psychological review, V 72, pp. 505-514.
- Forsyth D.A., Zisserman A., 1990. *Shape from Shading in the Light of Mutual Illumination*, Image and vision computing, V 8, pp. 29-42.
- Forsyth D.A., Zisserman A., 1991. *Reflections on Shading*, IEEE PAMI, V 13 N 7, pp. 671-679.

- Frankot R.T., Chellappa R., 1988. *A Method for Enforcing Integrability in Shape from Shading Algorithms*, IEEE PAMI, V10 N 4, pp. 439-451.
- Frankot R.T., Chellappa R., 1990. *Estimation of Surface Topography from SAR Imagery Using Shape from shading techniques*, Artificial intelligence, V 43 N 3, pp. 271-310.
- Freeman W.T., 1996. *The generic viewpoint assumption in a Bayesian framework*, in Knill D.G. Richards W., *Perception as a bayesian inference*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Gershon R., Jepson A.D., Tsousos J.K., 1986. *Ambient illumination and the determination of material changes*, Journal of the optical society of America, A 3, pp. 1700-1708.
- Gibson J.J., 1950a. *The perception of visual surfaces*, American journal of psychology, V 63, pp. 367-384.
- Gibson J.J., 1950b. *The perception of visual world*, .
- Gibson J.J., 1972. *The information available in pictures*, Leonardo, 4, pp. 27-35.
- Gilchrist A.L., 1977. *Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement*, Science, V 195 N 4274, pp. 185-187.
- Gilchrist A.L., 1979. *The perception of surface blacks and whites*, Scientific american, V 240 N 3, pp. 112-124.
- Gilchrist A.L. e Jacobsen A., 1984. *Perception of lightness and illumination in a world of one reflectance*, Perception, V 13, pp. 5-19.
- Gombrich E.H., 1995. *Shadows. The depiction of cast shadow in western art*, London, National Gallery Publication.
- Gombrich E.H., 1995. *Shadows. The depiction of cast shadows in the western art*, National Gallery Publications. London.
- Greenberg D.P., 1989. *Mutual illumination*, Science, 244, pp. 166-173.
- Gregory R.L., 1970. *The intelligent eye*, MacGraw-Hill. New York.
- Gregory R.L., 1980. *Perception as hypotheses*, Philosophical Transactions of the Royal society of London, B, 290, pp. 181-197.
- Gregory R.L., 1998. *Eye and brain*, Oxford university press.
- Grimson, 1981. *From images to surface. A computational study of early visual system*, Cambridge, MA: MIT Press.



- Haddon J., Forsyth D., 1998. *Shading primitives: finding folds and shallow grooves*, International Conference on Computer Vision Proceedings, Jan.
- Haddon J.F., 1988. *Generalized threshold selection for edge detection*, Pattern Recognition, vol. 21, pp. 195-203.
- Hagen M., 1976. *The development of sensitivity to cast and attached shadows in pictures as a information for the direction of the source of illumination*, Perception & psychophysics, V 20, pp. 25-28.
- Hayes A., 1988. *Identification of two tone images: some implications for high and low spatial frequency processes in human vision*, Perception, V 17, pp. 429-436.
- Hershenson m., 1999. *Visual space perception*, Cambridge, MIT Press.
- Hill H., Bruce V., 1996. *Effects of lighting on the perception of facial surfaces*, Journal of experimental psychopysics, Human perception and performance, V 22 N 4, pp. 986-1004.
- Hogarth B., 1984. *La tecnica del chiaroscuro*, Milano, Editiemme.
- Horn B.K.P., 1970. *Shape from shading: a method for obtaining the shape of smooth opaque object from one view*, Technical report, A.I. Rep. 79 Massachusetts Inst. Technol., ristampato in Winston (Ed.), 1975, *The Psychology of Computer Vision*, New York, McGraw-Hill.
- Horn B.K.P., 1975. *Obtaining shape from shading information*, in P. H. Wistron (Ed.), *The psychology of computer vision*, New York, McGraw-Hill, pp. 115-155.
- Horn B.K.P., 1975. *Shape From Shading: A Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object From One View*, in Winston (Ed.), *The Psychology of Computer Vision*, New York, McGraw-Hill.
- Horn B.K.P., 1977. *Understanding image intensities*, Artificial Intelligence, 8, pp. 201-231.
- Horn B.K.P., 1977. *Understanding image intensities*, Artificial intelligence, V 8, pp. 201-231.
- Horn B.K.P., 1990. *Height and gradient from shading*, International journal of computer vision, V 5 N 1, pp. 37-67.

- Horn B.K.P., Brooks M.J., 1989. *Shape from shading*, Cambridge, MIT Press.
- Horn B.K.P., Schunck B.G., 1981. *Determining optical flow*, Artificial Intelligence, 17, pp. 185-203.
- Horn B.K.P., Szeliski R.S., Yuille A.L., 1993. *Impossible shaded images*, IEEE PAMI, V 15 N 2, pp. 166-170.
- Huffman D.A., 1971. *Impossible objects as a nonsense sentences*, Machine Intelligence, V 6, pp. 295-323.
- Ikeuchi K. Horn B.K.P., 1981. *Numerical shape from shading and occlusion boundaries*, Artificial intelligence, V 15 N 1, pp. 141-184.
- Johnston A., Curran W., 1996. *Investigating shape-from-shading illusions using solid objects*, Vision Research, 36, pp. 2827-2835.
- Johnston A., Passmore P.J., 1994a. *Independent encoding of surface orientation and curvature*, Vision Research, V 34 N 22, pp. 3005-3012.
- Johnston A., Passmore P.J., 1994b. *Shape from shading. I: the surface curvature and orientation*, Perception, V 23, pp. 169-189.
- Johnston A., Passmore P.J., 1994c. *Shape from shading. II: Geodesic bisection and alignment*, Perception, V 23, pp. 191-200.
- Julesz B., 1971. *Foundation of Cyclopean perception*, Chicago, University of Chicago Press.
- Kácha P., Petr V., 1996. *Camouflage and mimicry in fossils*, Acta Musei Nationalis Pragae, Ser. B., Historia Naturalium, 51(1-4), pp. 53-82.
- Kaiser K., 1996. *The joy of visual perception*, .
- Kemp R., Pike G., , White P. Musselman A., 1996. *Perception and recognition of normal and negative faces: the role of shape from shading and pigmentation cues*, Perception, V 25, pp. 37-52.
- Kersten D., Knill D.C., Mamassian P., Bülthoff H.H., 1996. *Illusory motion from shadows*, Nature, 379, p. 31.
- Kersten D., Mamassian P., Knill D.C., 1997. *Moving cast shadows induce apparent motion in depth*, Perception & psychophysics, V 26 N 4, pp. 171-192.

- Khodulev A.B., Kopylov E.A., 1996. *Physically accurate lighting simulation in computer graphics software*, .
- Kleffner D.A., Ramachandran V.S., 1992. *On the perception of shape from shading*, Perception & psychophysics, V 52 N 1, pp. 18-36.
- Knill D.C., Kersten D., 1990. *Learning a near-optimal estimator for surface shape from shading*, Computer vision, Graphic and image processing, V 50, pp. 75-100.
- Knill D.C., Mamassian P., Kersten D., 1993. *The geometry of shadows*, Technical report, 93-47 Departement of computer science University of Minnesota.
- Knill D.C., Richards W., 1996. *Perception as a bayesian inference*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Koenderink J.J., 1990. *Solid shape*, MIT Press, Cambridge MA..
- Koenderink J.J., Kappers A.M.L., Todd J.T., Norman J.F., Philips F., 1996. *Surface range and attitude probing in stereoscopically presented dynamic scenes*, Journal of experimental psychopysics, Human perception and performance, 22, pp. 869-878.
- Koenderink J.J., Lappin J.S., 1996. *Perturbation study of shading in pictures*, Perception, 25, pp. 1009-1026.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., 1980. *Photometric invariants related to solid shape*, Optica Acta, V 27 N 7, pp. 981-996.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., 1982. *The shape of smooth objects and the way contours end*, Perception, V 11, pp. 129-137.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., 1993. *Illuminance critical points on generic smooth surfaces*, Journal of the Optical Society of America, A 10, pp. 844-854.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., Kappers A.M.L., 1992. *Surface perception in pictures*, Perception & psychophysics, V 52 N 5, pp. 487-496.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., Kappers A.M.L., 1994. *On so called paradoxical monocular stereoscopy*, Perception, V 23, pp. 583-594.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., Kappers A.M.L., 1995. *Depth relief*, Perception, V 24, pp. 115-126.

- Koenderink J.J., van Doorn A.J., Christou C., Lappin J.S., 1996. *Perturbation study of shading in pictures*, Perception, V 25, pp. 1009-1026.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., Kappers A.M.L., 1996. *Pictorial surface attitude and local depth comparison*, Perception & psychophysics, V 58 N 2, pp. 163-173.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., Christou C., Lappin J.S., 1996. *Shape constancy in pictorial relief*, Perception, V 25, pp. 115-164.
- Koenderink J.J., van Doorn A.J., Christou C., 1995a. *Shape constancy under variation of illumination*, Perception, V 24 supplement, pp. 34-35.
- Koenderink J.J., 1993. *What is a "feature"?*, Journal of intelligent systems, V 3 N 1.
- Kopfermann, 1930. *Psychologische Untersuchungen über die Wirkung zweidimensionaler Darstellung körperlicher Gelibe*, Psychologische Forschung, 37, pp. 1-24.
- Langer M.S., Bülthoff H.H., 1999. *Perception of shape from shading on a cloudy day*, Technical report, 073.
- Langer M.S., Bülthoff H.H., 2000. *A prior for global convexity in local shape from shading*, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Technical report, N 081.
- Langer M.S., Zucker S.W., 1996. *Local qualitative shape from active shading*, in Exploratory Vision, Springer Ed., Landy M.S. Malvey L.T. Pavel M. eds., pp. 191-202.
- Lappin J.S., Doner J.F, Kottas B., 1980. *Minimal conditions for the visual detection of structure and motion in three dimensions*, Science, V 209, pp. 717-719.
- Legnagne R., Fua P., Monga O., 2000. *3D stereo reconstruction of human faces driven by differential constraints*, Image and vision computing, V 18, pp. 337-343.
- Livingstone M.S., 1988. *Art, illusion and the visual system*, Scientific american, V 258 N 1, pp. 68-75.

- Loncaric S., 1998. *A survey of shape analysis techniques*, Pattern recognition, V 21 N 8, pp. 983-1001.
- Macmillan N.A., Creelman C.D., 1991. *Detection theory: a user's guide*. New York, Cambridge University press.
- Mackworth A.K. 1973. *Interpreting pictures of polyhedral scenes*, Artificial Intelligence, V 4, pp. 121-137.
- Mallot H.A., 1997. *Spatial scale in stereo and shape-from-shading: image input mechanism task*, Perception, V 26 N 9, pp. 1137-1146.
- Mamassian P., 1995. *Surface representations for visual perception and action*, International Dissertation Abstracts, sect. sciences and engineering, V 56 (3B), p. 1727.
- Mamassian P., Kersten D., 1996. *Illumination, shading and the perception of local orientation*, Vision Research, V 36 N 15, pp. 2351 - 2367.
- Mamassian P., Knill D.C., Kersten D., 1998. *The perception of cast shadows*, Trends in cognitive science, V 2 N 8, pp. 288-295.
- Marr D., 1982. *Vision*, Ed Freeman & Company NY.
- Marr D., Nishihara H.K., 1978. *Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes*. Proceedings of the Royal society of London, B, 200, pp. 269-294.
- Martinsson P.G., ???. *A new method for solving the image irradiance equation using characteristics*, Technical report, University of technology, Goteborg, Department of mathematics.
- Massironi, 1998. *Fenomenologia della percezione visiva*, Mulino Bologna.
- Mingolla E., Todd J.T., 1984. *Computational techniques for the graphic simulation of quadric surfaces*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 10, pp. 740-745.
- Mingolla E., Todd J.T., 1986. *Perception of solid shape from shading*, Biological cybernetics, V 53, pp. 137-151.
- Moore C., Cavanagh P., 1998. *Recovery of 3D volume from 2-tone images of novel objects*, Cognition, V 67, pp. 45-71.
- Nagel H.H., 1981. *On the derivation of 3D rigid point configurations from image sequences*, Proceedings of the IEEE Conference on Pattern

- Recognition and Image Processing, New York: IEEE Computer Society Press, pp. 103-108.
- Nayar S.K., Oren M., 1995. *Visual appearance of matte surfaces*, Science, V 267, pp. 1153-1156.
- Newmann H., Pessoa L., Mingolla E., 1998. *A neural architecture of brightness perception: non-linear contrast detection and geometry driven diffusion*, Image and vision computing, V 16, pp. 423-446.
- Nicolaides K., 1941. *The natural way to draw*, Houghton Mifflin. Boston.
- Niemann T., Lappe M., Hoffmann K.-P., 1996. *Visual inspection of three-dimensional objects by human observers*, Perception, V 25, pp. 1027-1042.
- Nitzberg M., Mumford D., 1990. *The 2.1-D sketch*, IEEE, pp. 138-144.
- Norman J.F., Todd J.T., 1994. *Perception of rigid motion in depth from the optical deformations of shadow and occlusion boundaries*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 20 N 2, pp. 343-356.
- Norman J.F., Todd J.T., Phillips F., 1995. *The perception of surface orientation from multiple sources of optical information*, Perception & psychophysics, V 57 N 5, pp. 629-636.
- Palmer S., 1999. *Vision Science*, MIT Press.
- Paoluzzi A., 1987. *Informatica grafica*, NIS.
- Pentland A.P., 1982. *Finding the illuminant direction*, Journal of the optical society of America, V 72 N 4, pp. 448-455.
- Pentland A.P., 1984. *Local shading analysis*, IEEE PAMI, PAM 16, pp. 170-187.
- Pentland A.P., 1989. *Shape information from shading: A theory about human perception*, Spatial Vision, V 4 N 2/3, pp. 165-182.
- Pentland A.P., 1990. *Linear shape from shading*, International journal of computer vision, V 4, pp. 153-162.
- Pentland A.P., 1991. *Photometric Motion*, IEEE PAMI, V 13 N 9, pp. 879-890.

- Perrett D.I., Harries M.H., 1988. *Characteristic views and the visual inspection of simple faceted and smooth objects: tetrahedra and potatoes*, Perception, V 17, pp. 703-720.
- Perrone J.A., 1982. *Visual slant underestimation: a general model*, Perception, V 11, pp. 641-654.
- Phillips F., Todd J.T., 1996. *Perception of local 3D shape*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 22 N 4, pp. 930-944.
- Pizlo, Salach-Golyska, 1995. *3D shape perception*, Perception & psychophysics, V 57 N 5, pp. 692-714.
- Pollick F.E., Watanabe H., Kawato M., 1996. *Perception of local orientation from shaded images*, Perception & Psychophysics, 58, pp. 762-780.
- Ramachandran V.S., 1988a. *Perceiving shape from shading*, Scientific american, pp. 58-65.
- Ramachandran V.S., 1988b. *Perception of shape from shading*, Nature, V 331, pp. 163-166.
- Ramachandran V.S., 1988c. *The perception of depth from shading*, Scientific american, V 269, pp. 76-83.
- Reichardt W.E., Schlogl R.W., 1988. *A two dimensional field theory for motion computation. First order approximation; translatory motion of rigid patterns*, Biological Cybernetics, 60, pp. 23-35.
- Reichel F.D., Todd J.T., 1990. *Perceived depth inversion of smoothly curved surfaces due to image orientation*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 16, pp. 653-664.
- Reichel F.D., Todd J.T., Yilmaz E., 1995. *Visual discrimination of local surface depth and orientation*, Perception & Psychophysics, 57, pp. 1233-1240.
- Richter A., 1953. *The notebooks of Leonardo da Vinci / selected and edited by Irma A. Richter*, New York, Oxford Press.
- Ross W.D., Mingolla E., 1998. *Recent progress in modelling neural mechanisms of form and color vision*, Image and vision computing, V 16, pp. 447-472.

- Schwartz B.J., Sperling G., 1983. *Luminance controls the perceived 3-D structure of dynamic 2-D display*, Psychonomic Society bulletin, V21 N 6, pp. 456-458.
- Seyama J., Takao S., 1998. *Shape from shading: estimation of reflectance map*, Vision Research, V 38 N 23, pp. 3805-3815.
- Shepard R.N., 1984. *Ecological constraints on internal representation: resonant kinematics of perceiving, imaging, thinking and dreaming*, Psychological Review, V 91 N4, pp. 417-447.
- Shimon E., 1995. *Shape-from-shading course*, W10.
- Smith G., 1983. *Shape from shading an assessment*, SRI Artificial Intelligence Center, Tech. Note 287.
- Startchik S., Milanese R., Pun T., 1998. *Projective and illumination invariant representation of disjoint shapes*, Image and vision computing, V 16, pp. 713-723.
- Stevens K.A., 1983. *Slant and tilt: the visual encoding of surface orientation*, Biological cybernetics, V 46, pp. 183-195.
- Stevens K.A., 1987. *Visual object perception from a computational perspective*, in Visual object processing: a cognitive neuropsychological approach Humphreys G.W. Riddoch M.J., Erlbaum London, pp. 17-42.
- Stewart A.J., Langer M.S., 1997. *Toward accurate recovery of shape-from-shading under diffuse lighting*, IEEE PAMI, V 19 N 9, pp. 1020-1025.
- Sun J., Perona P., 1997. *Shading and stereo in early perception of shape and reflectance*, Perception, V 26 N 4, pp. 519-529.
- Sun J., Perona P., 1998. *Where is the sun?*, Nature Neuroscience, V 1 N 3, pp. 183-184.
- Symons L.A., Cuddy F., Humprey K., 2000. *Orientation tuning of shape-from-shading*, Perception & Psychophysics, V 62 N 3, pp. 557-568.
- Tarr M.J., Kersten D., Bülthoff H.H., 1998. *Why the visual system might encode the effects of illumination*, Vision Research, v 38, pp. 2259-2275.



- Thompson W. B., Shirley P., Smits B., Kersten D. J., Madison C., 1998. *Visual Glue*, Technical report, UUCS-98-007 Computer Science Department, University of Utah.
- Thompson W. B., Smits B., Shirley P., Kersten D. J., Madison C., 1999. *Visual Glue*, IEEE Transactions on Graphics, March.
- Todd J.T., van Doorn A.J., Kappers A.M.L., 1996. *Effects of changing viewing conditions on the perceived structure of smoothly curved surfaces*, JEP: HPP, V 22 N 3, pp. 695-706.
- Todd J.T., 1995. *Perception of structure from motion: Is projective correspondence of moving elements a necessary condition?*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, 57, pp. 689-710.
- Todd J.T., Ackerstom R.A., 1987. *Perception of three-dimensional form from patterns of optical texture*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 13, pp. 242-255.
- Todd J.T., Koenderink J.J., , van Doorn A.J.Kappers A.M.L., 1996. *Changing viewing conditions for smooth curved surfaces*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 22 N 3, pp. 695-706.
- Todd J.T., Mingolla E., 1983. *Perception of surface curvature and direction of illumination from shading*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 9 N 4, pp. 583-595.
- Todd J.T., Mingolla E., 1984. *Simulation of curved surfaces from patterns of optical texture*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V 10, pp. 734-739.
- Todd J.T., Norman J.F., 1991. *The visual perception of smoothly curved surfaces from minimal apparent motion sequences*, Perception & psychophysics, V 50 N 6, pp. 509-523.
- Todd J.T., Norman J.F., 1999. *Perceiving directions of illumination*, Paper presented at the 40th Annual Meeting of the Psychonomic Society, Los Angeles, CA, november.

- Todd J.T., Norman J.F., Koenderink J.J., Kappers A.M.L., 1997. *Effects of texture, illumination and surface reflectance on stereoscopic shape perception*, Perception, V 26, pp. 807-822.
- Todd J.T., Reichel F.D., 1989. *Ordinal structure in the visual perception and cognition of smoothly curved surfaces*, Psychological review, V 96, pp. 643-657.
- Treisman A., 1982. *Perceptual grouping and attention in visual search for features and for objects*, Journal of experimental psychophysics, Human perception and performance, V8 N2, pp. 194-214.
- Troje N.F., Siebeck V., 1998. *Illumination-induced apparent shift in orientation of human heads*, Perception, V 27 N 6, pp. 671-680.
- Tunley H., 1991. *Dynamic image segmentation and optic flow extraction*, IEEE, V 1, pp. 599-604.
- Tyler C.W., 1998. *Diffuse illumination as a default assumption for shape from shading in the absence of shadow*, Journal of Imaging Science and Technology, V 42, pp. 319-325.
- Tyler C.W., Lin L., 1996. *Saturation revealed by clamping the gain of the retinal light response*, Vision Research, V 36, pp. 2553-2562.
- Von Fieandt K.F., 1938. *The impression of depth from change in direction of illumination* (titolo originale *Ueber Sehen von Tiefengebilden bei wechselnder Beleuchtungsrichtung*), Helsingfors, Psychologischen Institut Der Universitaet Helsinki.
- Von Fieandt K.F., 1949, *Das phänomenologische Problem von Licht und Schatten*, Acta Psychologica, V 6, pp. 337-57.
- Waldon S., Dyer C.R., 1993. *Dynamic Shading, Motion Parallax and Qualitative shape*, Technical report, University of Wisconsin, Computer Science Departement.
- Wechsler H., 1990. *Computational vision*, London , Academic Press.
- Weinshall D., 1994. *The Shape of Shading*, Journal of Math imaging and vision, V 4 N 2, pp. 119-138.
- Wenderoth P., Hickey N., 1993. *Object and head orientation effects on symmetry perception defined by shape from shading*, Perception, V 22, pp. 1121-1130.

- Winer B.J., 1971. *Statistical principles in experimental design*, New York, McGraw-Hill.
- Woodham R.J., 1978. *Photometric method for determining surface orientation from multiple images*, Optical Engineering, V 19, pp. 139-144.
- Woodham R.J., 1981. *Analyzing images of curved surfaces*, Artificial intelligence, V 17, pp. 117-140.
- Worthington P.L., Hancock E.R., 1999. *Needle map recovery using robust regularizers*, Image and vision computing, V 17, pp. 545-57.
- Yamada T.S., Saito H., Ozawa S., 1999. *3D Reconstruction of Skin Surface from Image Sequence*, IEICE Transactions on Information and Systems, V E83-D N 7, Luglio, pp.1415-1421.
- Yonas A., Goldsmith L.T., Hallstrom J.L., 1978. *Development of sensitivity to information provided by cast shadows in pictures*, Perception, V 7, pp. 333-341.
- Yonas A., Kuskowski M., Sternfels S., 1979. *The role of frame of reference in the development of responsiveness to shading*, Child development, V 50 N 2, pp. 493-500.
- Young M.J., Landy M.S., Maloney L.T., 1993. *Depth from combination of texture and motion*, Vision Research, V 33 N 18, pp. 2685-2696.
- Zhang R., Mubarak S., 1997. *Iterative shape recovery from multiple images*, Image and vision computing, V 15, pp. 801-814.
- Zheng Q., Chellappa R., 1991. *Estimation of Illuminant Direction, Albedo, and Shape from Shading*, IEEE PAMI, V 13 N 7, pp. 680-702.
- Zisserman A., Giblin P., Blake A., 1989. *The information available to a moving observer from specularities*, Image and vision computing, V 7, pp. 38-42.

# Siti Web

## Introduzione

<http://dragon.uml.edu/psych/hor.html> Nik Williams, "Nik Williams captured a superb illusion during restoration of a 2000 year old Egyptian mummy".  
<http://www.artlex.com/> "Artlex"; dizionario di termini artistici.  
<http://www.yorku.ca/eye/crater.htm> "Which avocado has the pit?"; figura che rappresenta l'ambiguità convessità/concavità determinata dallo shading.  
<http://www.worldofescher.com/gallery/> Escher M.C., "The world of Escher"; molte opere dell'artista (a proposito dello shading due esempi sono "Convex and concave" e "Drawing hands").  
<http://www.yorku.ca/> Kaiser K., 1996, "The joy of visual perception", libro web sulla percezione.  
<http://www.graphics.cornell.edu/~phil/GI/> Dutré P., 2000, "Global illumination compendium", Technical report della Cornell University che tratta alcuni aspetti fisici dell'illuminazione.

## Capitolo 1

<http://www.cs.berkeley.edu/~daf/shading.html> <http://www.cs.berkeley.edu/~haddon/research/sfs5.html>  
Haddon John e Forsyth David, "Shading primitives".  
<http://venezia.rockefeller.edu/group/papers/full/nature/nature.html> Atick Joseph J., Griffin Paul A. e Redlich A. Norman, "The Vocabulary of Shape: Principal Shapes for Probing Perception and Neural Response"; ipotesi per la spiegazione del funzionamento delle face-cells.  
<http://vision.psych.umn.edu/www/kersten-lab/shape.html> "Kersten Lab"; immagine dello stimolo utilizzato nell'articolo di Mamassian P e Kersten D. (1996) "Illumination, shading and the perception of local orientation", Vision Research., 36 (15), 2351-2367.  
<http://www.cquest.utoronto.ca/psych/psy280f/ch7/shading.html> Alcune immagini che evidenziano la percezione di profondità data dallo shading.  
<http://www.cssip.edu.au/~vision/shading.html> Brooks Mike, "Shape from shading"; abstract di un lavoro sull'analisi dello shading determinato da una maschera.  
<http://www.hhmi.org/senses/a/a110.htm> "It's all in the brain"; animazione che evidenzia il raggruppamento percettivo mediante lo shading.  
[http://www.illusionworks.com/html/shape\\_from\\_shading.html](http://www.illusionworks.com/html/shape_from_shading.html) "Shape from shading"; Filmato.  
<http://www.psrw.com/~markc/Articles/SFS/sfs.html> Carlotto Mark J., "Shape-from-shading"; discussione sul metodo di risolvere i problemi dello shape-from-shading per determinare la forma della superficie lunare.  
<http://www.perceptionWeb.com/perc0698/troje.html> Troje e Siebeck, Animazione sull'effetto della direzione di illuminazione dei volti.

## Capitolo 2

<http://epsych.msstate.edu/descriptive/Vision/TableandBall/BallTable4.html> Bradshaw Gary, "Ball and shadow illusion"; animazione interattiva che dimostra l'influenza del movimento dell'ombra sulla percezione della profondità.  
[http://epunix.biols.susx.ac.uk/Home/George\\_Mather/Motion/index.html](http://epunix.biols.susx.ac.uk/Home/George_Mather/Motion/index.html) "Shadow Motion"; il movimento dell'ombra determina l'illusione di profondità secondo quanto indicato dall'assunzione di un'illuminazione stazionaria.  
<http://psychlab1.hanover.edu/classes/Sensation/shadow/> "The effects of shadows"; dimostrazione della dipendenza della percezione di profondità dall'assunzione sulla provenienza della luce dall'alto.

- <http://www.ehess.fr/centres/lscp/persons/pallier/perception/ball-in-a-box.mov> e  
<http://www.ehess.fr/centres/lscp/persons/pallier/perception/green-square.mov> Mamassian  
 Pascal, animazioni che evidenziano la percezione di profondità data dal movimento  
 dell'ombra.
- <http://www.illusionworks.com/html/shadow.html> "Shadow", illusione di Adelson sul colore dell'ombra.  
[http://www.illusionworks.com/html/shadow\\_ball.html](http://www.illusionworks.com/html/shadow_ball.html) "Shadow and ball"; animazione interattiva che  
 dimostra l'influenza del movimento dell'ombra sulla percezione della profondità.
- [www.cs.utah.edu/vision/sim/html-pubs/glue/node2.html](http://www.cs.utah.edu/vision/sim/html-pubs/glue/node2.html)  
<http://www.cs.utah.edu/vissim/papers/glue/glue.html> Thompson W.B., Shirley P., Smits B., Kersten D.J.,  
 Madison C., 1998, "Visual Glue".
- [http://www.ski.org/CWTyler\\_lab/CWTyler/PrePublications/SPIE97/Shape-from-Shading.html](http://www.ski.org/CWTyler_lab/CWTyler/PrePublications/SPIE97/Shape-from-Shading.html) Tyler,  
 "Diffuse illumination as a default assumption for shape- from-shading in the absence of  
 shadows".
- <http://www-bcs.mit.edu/people/adelson/publications/gazzan.dir/gazzan.htm> Adelson Edward, "Lightness  
 Perception and Lightness Illusions".

## Capitolo 3

- <http://kybele.psych.cornell.edu/~edelman/Course/shading/shading.html>  
<http://coverage.cnet.com/Resources/Info/Glossary/Terms/shading.html> CNet Glossary; definizione di  
 shading in ambiente Computer Graphics.
- <http://homepages.tesco.net/~p.wilkinson/BlendShade.htm> "Shading & Blending"; metodi di disegno.  
<http://online.caup.washington.edu/courses/arch411/testdrive/2.Rendering/4.Shading/0.default.html>  
 Johnson Brian, "Shading: Overview"; discussione dello shading nella Computer Graphics.
- <http://Web.idirect.com/~gig/shader1.htm> McArdle Steve, "Shading principles"; immagini della classica  
 teiera realizzata con diversi materiali.
- [http://www.education.siggraph.org/materials/HyperGraph/scanline/shade\\_models/shading.htm](http://www.education.siggraph.org/materials/HyperGraph/scanline/shade_models/shading.htm) "Shading  
 Models for Scan-Line Graphics"; confronto del rendering ottenuto con diversi modelli di  
 shading.
- <http://www.geocities.com/SiliconValley/Horizon/6933/shading.html> "Shading and Lighting"; tutorial e  
 algoritmo per la realizzazione dello shading.
- <http://www2.evansville.edu/drawinglab/shading.html> Larmann R. M., "Techniques for Shading and  
 Texture"; alcune specificazioni dell'interazione della luce con gli oggetti utilizzabili nella  
 pittura e nel rendering.
- <http://Graphics.cs.ucdavis.edu/Graphicnotes/Shading/Shading.html> Joy K., 1999, "Why is shading a hard  
 problem?"; trattazione delle difficoltà nell'implementazione di uno shader in Computer  
 Graphics.
- <http://www.javaworld.com/javaworld/jw-07-1997/jw-07-howto.html> Sundsted Todd , "3D computer  
 graphics: Moving from wire-frame drawings to solid, shaded models"; implementazione di  
 shading in Java.

## Varie

- <http://www.sgi.com/grafica/shadows/index.html>  
<http://sandy.www.media.mit.edu/people/sandy/> Pagina personale di Alex Pentland.  
<http://www.ai.mit.edu/people/poggio/> Pagina personale di Tommaso Poggio.  
<http://www.psy.gla.ac.uk/~pascal/> Mamassian Pascal; sito personale con bibliografia.  
<http://www.yorku.ca/eye/> Kaiser Peter, "The Joy of Visual Perception: A Web Book".  
[http://www.sandlotscience.com/Ambiguous/Ambiguous\\_frm.htm](http://www.sandlotscience.com/Ambiguous/Ambiguous_frm.htm) "Missing corner cube"; figura ambigua  
 tridimension

## ***Indice degli autori***

- Ackerstom; 153  
Adelson; 10; 37; 140; 157  
Arnheim; 1; 9; 11; 56; 60; 140  
Atick; 156  
Attneave; 10; 140  
Barrow; 9; 75; 140  
Baxandall; 56; 60; 140  
Beck; 8; 13; 55; 60; 66; 140  
Benson; 43; 44; 141  
Berbaum; 33; 44; 46; 61; 141  
Bergen; 140  
Bever; 33; 44; 46; 61; 141  
Beves; 141  
Bischof; 143  
Blake; 54; 67; 68; 69; 77; 78; 141; 155  
Bloj; 141  
Braje; 58; 141  
Braun; 12; 141  
Brewster; 34; 37; 39; 44; 141  
Brooks; 141; 146; 156  
Bruce; 49; 145  
Budelmann; 11; 143  
Bulthoff; 33; 42; 54; 58; 60; 61; 62; 67; 68; 69;  
94  
Bülthoff; 19; 33; 39; 42; 43; 52; 54; 58; 60; 61;  
62; 67; 68; 69; 72; 73; 77; 78; 94; 127; 136;  
138; 141; 146; 148; 152  
Burigana; 3; 8; 19; 20; 36; 141  
Caudek; 79; 95; 98; 99; 100; 105; 106; 111;  
116; 133; 134; 143  
Cavanagh; 14; 39; 56; 57; 59; 60; 142; 149  
Chaudhuri; 143  
Chellappa; 144; 155  
Christou; 41; 42; 47; 75; 85; 106; 142; 148  
Chung; 33; 44; 46; 61; 141  
Cott; 11; 142  
Cuddy; 152  
Curran; 34; 39; 48; 52; 125; 126; 138; 142; 146  
Curvedness; 6  
Cutting; 142  
De Haan; 75; 142  
de Oliveira Neto; 143  
Deshpande; 80; 143  
Domini; 79; 95; 98; 99; 100; 105; 106; 111;  
116; 133; 134; 143  
Doner; 148  
Doorn; 15; 18; 30; 31; 33; 36; 40; 41; 42; 46;  
47; 48; 51; 66; 68; 74; 75; 77; 78; 106; 142;  
147; 148; 153  
Doshier; 73; 143  
Dyer; 154  
Egusa; 37; 136; 143  
Erens; 14; 33; 45; 61; 75; 79; 94; 126; 133; 142;  
143  
Farnè; 66; 143  
Ferguson; 11; 143  
Flock; 143  
Forsyth; 30; 54; 63; 89; 90; 91; 92; 143; 145;  
156  
Frankot; 144  
Freeman; 36; 52; 144; 149  
Fua; 148  
Gershon; 144  
Giblin; 68; 155  
Gibson; 34; 40; 44; 45; 144  
Gilchrist; 6; 37; 63; 144  
Gombrich; 144  
Greenberg; 144  
Gregory; 13; 14; 36; 42; 43; 121; 133; 135; 144  
Griffin; 156  
Grimson; 28; 144  
Haan; 75; 142  
Haddon; 30; 145; 156  
Hagen; 43; 44; 145  
Hanckok; 24; 155  
Harries; 151  
Hayes; 145  
Hershenson; 145  
Hickey; 154  
Hill; 49; 145  
Hoffmann; 150  
Hogarth; 7; 145  
Horn; 18; 22; 23; 24; 25; 26; 34; 36; 39; 54; 65;  
76; 126; 141; 145; 146  
Huffman; 19; 146  
Humphrey; 152  
Hurlbert; 141

- 
- Ikeuchi; 39; 146  
 Jepson; 144  
 Johnston; 15; 19; 33; 34; 35; 39; 41; 42; 48; 49;  
     52; 74; 75; 125; 126; 138; 142; 146  
 Joy; 157  
 Julesz; 13; 146  
 Kácha; 11; 146  
 Kaiser; 146; 157  
 Kappers; 14; 15; 33; 36; 40; 42; 45; 47; 51; 61;  
     67; 78; 79; 94; 106; 126; 133; 143; 147; 148;  
     153; 154  
 Kawato; 151  
 Kemp; 146  
 Kersten; 15; 33; 39; 40; 41; 42; 43; 48; 49; 58;  
     59; 60; 61; 62; 64; 74; 94; 106; 134; 141;  
     146; 147; 149; 152; 153; 156; 157  
 Khodulev; 147  
 Kleffner; 13; 33; 37; 147  
 Knill; 15; 33; 43; 49; 59; 61; 62; 94; 106; 134;  
     140; 144; 146; 147; 149  
 Knowles; 141  
 Koenderink; 5; 6; 14; 15; 18; 30; 31; 33; 36; 40;  
     41; 42; 45; 46; 47; 48; 61; 66; 67; 68; 74; 75;  
     77; 78; 79; 85; 94; 106; 122; 126; 133; 135;  
     137; 142; 143; 147; 148; 153; 154  
 Kopfermann; 148  
 Kopylov; 147  
 Kottas; 148  
 Kuskowski; 155  
 Landy; 148; 155  
 Langer; 72; 73; 127; 136; 138; 148; 152  
 Lappe; 150  
 Lappin; 47; 106; 147; 148  
 Leclerc; 14; 39; 56; 57; 59; 60; 142  
 Legge; 58; 141  
 Legnagne; 148  
 Lin; 154  
 Livingstone; 59; 148  
 Loncaric; 149  
 Mackworth; 19; 149  
 MacLeod; 142  
 Madison; 64; 65; 153; 157  
 Mallot; 19; 33; 39; 42; 52; 141; 149  
 Maloney; 155  
 Mamassian; 15; 33; 39; 40; 41; 42; 43; 48; 49;  
     59; 61; 62; 74; 94; 106; 134; 146; 147; 149;  
     156; 157  
 Marr; 9; 24; 28; 33; 58; 66; 68; 149  
 Martinsson; 149  
 Massironi; 60; 149  
 Messenger; 11; 143  
 Milanese; 152  
 Millard; 142  
 Mingolla; 3; 4; 12; 14; 15; 18; 23; 33; 40; 42;  
     46; 48; 51; 52; 61; 68; 69; 75; 86; 105; 110;  
     124; 149; 150; 151; 153  
 Monga; 148  
 Mubarak; 155  
 Mumford; 150  
 Musselman; 146  
 Nagel; 76; 149  
 Nayar; 150  
 Neto; 143  
 Newmann; 150  
 Nicolaides; 73; 136; 150  
 Niemann; 150  
 Nitzberg; 150  
 Noest; 75; 142  
 Norman; 11; 15; 52; 67; 77; 78; 79; 94; 99; 105;  
     133; 147; 150; 153; 154; 156  
 Oliviera; 143  
 Oren; 150  
 Ozawa; 80; 155  
 Palmer; 150  
 Paoluzzi; 83; 150  
 Passmore; 15; 19; 33; 35; 39; 41; 42; 49; 74; 75;  
     146  
 Pentland; 7; 10; 18; 25; 26; 27; 29; 32; 34; 36;  
     37; 40; 41; 45; 46; 52; 77; 78; 106; 133; 136;  
     140; 150; 157  
 Perona; 12; 37; 43; 152  
 Perrett; 151  
 Perrone; 151  
 Pessoa; 150  
 Petr; 11; 146  
 Philips; 147  
 Phillips; 11; 15; 52; 77; 78; 79; 94; 99; 105;  
     133; 150; 151  
 photometric; 24  
 Photonics; 140  
 Pike; 146  
 Pizlo; 151  
 Pollick; 151  
 Pun; 152  
 Ramachandran; 12; 13; 33; 34; 35; 37; 39; 43;  
     72; 106; 127; 135; 147; 151  
 Redlich; 156  
 Reichardt; 151  
 Reichel; 12; 15; 33; 39; 42; 51; 52; 75; 151; 154  
 Richards; 140; 144; 147  
 Richter; 16; 63; 151  
 Ross; 151  
 Saito; 80; 155  
 Salach-Golyska; 151  
 Schlogl; 151  
 Schunck; 146  
 Schwartz; 37; 136; 152  
 Seyama; 14; 52; 53; 152  
 Shepard; 68; 133; 135; 152  
 Shimon; 152  
 Shioiri; 142  
 Shirley; 64; 65; 153; 157  
 Siebeck; 49; 50; 94; 106; 154; 156  
 Smith; 152  
 Smits; 64; 65; 153; 157  
 Sperling; 37; 73; 136; 143; 152

- Startchik; 152  
Sternfels; 155  
Stevens; 142; 152  
Stewart; 152  
Sun; 12; 37; 43; 152  
Symons; 152  
Szeliski; 146  
Takao; 52; 152  
Tarr; 43; 58; 60; 61; 152  
Tenenbaum; 9; 75; 140  
Thompson; 64; 65; 153; 157  
Todd; 3; 4; 11; 12; 14; 15; 18; 23; 33; 39; 40;  
42; 46; 48; 51; 52; 61; 67; 68; 69; 75; 77; 78;  
79; 86; 94; 99; 105; 110; 124; 133; 147; 149;  
150; 151; 153; 154; 157  
Treisman; 13; 154  
Troje; 49; 50; 94; 106; 154; 156  
Tsousos; 144  
Tunley; 154  
Tyler; 72; 73; 154; 157  
van Doorn; 15; 18; 30; 31; 33; 36; 40; 41; 42;  
46; 47; 48; 51; 66; 68; 74; 75; 106  
Von Fieandt; 43; 46; 127; 131; 138; 154  
Waldon; 154  
Watanabe; 151  
Wechsler; 19; 36; 154  
Weinshall; 65; 154  
Wenderoth; 154  
White; 146  
Winer; 102; 155  
Woodham; 24; 25; 79; 155  
Worthington; 24; 155  
Wurst; 73; 143  
Yamada; 80; 155  
Yilmaz; 151  
Yonas; 43; 44; 61; 141; 155  
Young; 155  
Yuille; 146  
Zhang; 155  
Zheng; 155  
Zisserman; 30; 54; 63; 68; 89; 90; 91; 92; 141;  
143; 155  
Zucker; 73; 136; 148





