



“La grandezza della luce è nel generare infinite variazioni di buio”

J. Tanizaki, Elogio dell'ombra, Milano 1982

In Copertina: *Variazioni di buio*, Mahdia, Tunisia. Foto dell'autore.
In quarta di Copertina: Render di una scala in cemento faccia a vista di un spazio aperto da cui entra la luce solare.

Dottorato di Ricerca in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo

3

Luce ed ombra nella rappresentazione Rilettura storica e sperimentazioni eidomatiche

Daniele Calisi

Tutor: prof. Laura de Carlo, prof. Daniele Marini



Indice

00	Introduzione	9
01	La luce nelle teorie della visione	15
	01.1. Le teorie della visione nel mondo classico	19
	01.1.1 Gli atomisti	19
	01.1.2 La teoria platonica	20
	01.1.3 Aristotele	21
	01.1.4 Galeno e gli Stoici	22
	01.2. Euclide e Tolomeo	23
	01.2.1 I raggi visivi e la visione per angoli	23
	01.2.2 Tolomeo: il perfezionamento della teoria euclidea	25
	01.3. Sviluppo orientale delle teorie della visione	27
	01.3.1 Al-Kindi e lo sviluppo delle teorie nel mondo islamico	27
	01.3.2 Lo sviluppo delle teorie visive nell'Islam	32
	01.3.3 Hunain ibn Ishaq	32
	01.3.4 Avicenna e le critiche alle teorie visive	34
	01.3.5 Averroes e lo sviluppo della teoria aristotelica	37
	01.4. Sviluppo orientale della teoria intromissiva: Abu ibn al-Hasan ibn al-Haitham	38
	01.4.1 Alhazen e la teoria intromissiva complessiva	38
	01.5. La rinascita culturale in occidente: Robert Grosseteste	44
	01.6. La sintesi delle teorie ottiche orientali e occidentali nel XIII secolo	47
	01.6.1 Roger Bacon	48
	01.6.2 L'influenza teorica di Bacon: John Pecham e Vitellione	50
	01.6.3 L'arresto nello sviluppo di una teoria ottica valida del secolo XIV	52
	01.6.4 Henry di Langenstein	52
	01.6.5 John Buridian	55
	01.7. Leonardo da Vinci e il Rinascimento	57
	01.7.1 Conclusioni	64
	01.8. L'aspetto anatomico nella teoria della visione	65
	01.8.1 La <i>perspectiva</i> nel XVI sec.: Francesco Maurolico e Giovanni Battista della Porta	66
	01.9. Johannes Kepler	69

02	Fondamenti teorici e storici della teoria delle ombre e del chiaroscuro.	85
	02.1. Il primo teorizzatore: Alhazen	88
	02.2. I trattatisti rinascimentali	91
	02.2.1 Leonardo da Vinci: Il Codice C e il Trattato della Pittura	95
	02.2.2 Albrecht Dürer: la costruzione geometrica delle ombre	100
	02.2.3 Il contributo d'oltralpe di alcuni minori trattatisti	102
	02.3. Daniele Barbaro e la teoria delle ombre	105
	02.4. La trattatistica alla fine del XVI secolo	109
	02.5. Lo sviluppo della Teoria delle Ombre nel XVII secolo	114
	02.6. La prospettiva pratica di Pietro Accolti	126
	02.7. Interpretazioni della sorgente solare nel XVII secolo	128
	02.8. Il consolidamento delle teoria nel XIX secolo	134
	02.9. Conclusioni	137
03	Approfondimenti storici ed analisi critiche	145
	03.1. Alhazen: il primo teorizzatore.	148
	03.1.1 Le opere	148
	03.1.2 L'ottica	152
	03.1.3 Conclusioni	161
	03.2. Leonardo da Vinci: il Codice C e il Trattato di Pittura	163
	03.2.1 Il codice C e il trattato di pittura	163
	03.2.2 La teoria delle ombre nel codice C	165
	03.2.3 Alcune sperimentazioni sul Codice C	173
	03.2.4 Il trattato di pittura	185
	03.2.5 Il quinto libro: <i>dell'ombra e lume e della prospettiva</i>	188
04	Tecnologie avanzate e algoritmi di calcolo.	203
	04.1. Modelli locali di illuminazione	206
	04.1.1 Modello di Lambert	206
	04.1.2 Modello di Phong	208
	04.1.3 Il modello locale completo	209

04.2.	Lo smooth shading	210
04.2.1	Ombreggiatura di Gouraud	210
04.2.2	Ombreggiatura di Phong	211
04.3.	Le ombre portate e le sorgenti luminose	212
04.3.1	Metodi per il calcolo delle ombre portate	213
04.3.2	Sorgenti Luminose	214
04.4.	Modelli di illuminazione Globale	217
04.4.1	Tracciamento dei raggi: <i>Ray Tracing</i>	218
04.4.2	Metodo <i>Radiosity</i>	220
04.5.	Illuminazione HDRI	224
04.6.	Come realizzare una immagine HDRI	226
04.7.	Metodo di illuminazione della scena: il Probe mapping	230
05	Evoluzione degli studi sulle teorie della visione e della luce: quadro sinottico.	233
Appendice A	L'indice completo, corredato da illustrazioni, dei primi sei libri del De Aspectibus di Alhazen, nella traduzione latina del Risnero.	239
Appendice B	L'indice completo, corredato dalle illustrazioni, del quinto libro del Trattato di Pittura di Leonardo da Vinci, nella edizione di Francesco Melzi	291
Appendice C	Sperimentazione ed applicazioni	311
C.1.	Il modello di Lambert	313
C.2.	Modello fisico-fotografico e modello informatico	325
C.2.1	Modello fisico	325
C.2.2	Modello informatico	328
C.2.3	Analisi e comparazione dei risultati	329
C.6.	Realizzazione di immagini HDRI e illuminazione della scena	333
06	Bibliografia	345

C00 Introduzione

Il processo di sviluppo della teoria delle ombre e del chiaroscuro non può prescindere da secoli di disquisizioni sull'argomento della visione. In effetti, lo sviluppo delle teorie della visione affonda le proprie radici all'età ellenistica e il suo processo si protrae fino alla fine del XIX secolo.

La relazione che sussiste tra le due teorie è evidente: entrambe sono collegate al problema della propagazione della luce e a quali effetti produce sulle cose.

La luce che raggiunge gli oggetti viene riflessa o rifratta dando inizio ad una serie di azioni differenti: la luce che arriva (riflessa o rifratta ma anche quella diretta) all'occhio permette la visione; i raggi luminosi bloccati dai corpi generano i raggi d'ombra, prolungamento dei primi, che all'intersezione con altre superfici formano le ombre portate; i raggi luminosi riflessi o rifratti dalle cose innescano una serie di interazioni tra gli oggetti stessi, tali che ognuno di essi partecipa del colore e della luminosità di quelli intorno proporzionalmente alla distanza che li separa.

Il problema della visione è stato il primo ad essere studiato assiduamente dagli studiosi a partire dai filosofi del mondo antico e la propagazione della luce è il fondamento di queste teorie.

Accanto all'ottica esisteva naturalmente anche l'interesse per gli aspetti più propriamente anatomici connessi alla visione, ossia lo studio dell'occhio, della sua fisiologia e del suo funzionamento: i primi studi non potevano prescindere dai secondi. Anzi bisogna dire che proprio a causa della necessità, o curiosità, di capire alcuni fenomeni visivi e determinate deficienze ottiche, nonché le malattie dell'occhio, i filosofi, gli scienziati e i medici iniziarono i loro studi in questi settori disciplinari.

I teorici della visione, pertanto, inseriscono quasi sempre il proprio particolare schema anatomico dell'occhio, a volte fondato su studi diretti, a volte rielaborato da altri schemi, a volte adattandolo forzatamente per poter dimostrare le proprie personali teorie sulla propagazione della luce all'interno dell'occhio.

Tuttavia un problema che accomuna tutte le teorie della visione è costituito dal modo in cui si propaga la luce. Per cui: quale direzione hanno i raggi luminosi? Quale ruolo hanno nella visione umana?

La natura rettilinea dei raggi luminosi non era stata mai messa in discussione, almeno fino alla teoria ondulatoria e a quella elettromagnetica in epoca contemporanea.

Tuttavia, possiamo distinguere due grandi filoni di pensiero: da una parte la teoria estromissiva la quale credeva che fosse l'occhio a lanciare nello spazio i propri raggi visivi, dall'altra la teoria intromissiva la quale, al contrario, confidava nel fatto che erano le cose a "inviare" le proprie informazioni all'occhio riflettendo in sostanza i raggi luminosi.

Le critiche mosse reciprocamente dai teorici di una o l'altra teoria si susseguono nel corso dei secoli, fino a quando Alhazen (Abu ibn al-Hasan ibn al-Haitham), a cavallo tra i due millenni, dimostra, attraverso alcune semplici constatazioni dedotte da effetti reali, che l'unica teoria possibile è quella intromissiva: la visione è causata dai raggi luminosi che giungono all'occhio (per Alhazen quelli ortogonali solamente) dopo la riflessione o rifrazione sugli oggetti nello spazio reale. Se così non fosse l'occhio non proverebbe dolore se colpito da un bagliore o una forte luce. Nel processo di visione è l'occhio a ricevere qualcosa dall'esterno. La teoria estromissiva non poteva essere valida anche perché se l'occhio guarda per un lungo lasso di tempo una forte luce e poi l'osservatore muove lo sguardo, verso una zona scura e buia, egli continuerà a percepire una zona di chiarore, un disturbo, nel suo campo visivo. Se la teoria estromissiva fosse stata valida, e la vista dipendeva dai raggi visivi fuoriuscenti dall'occhio per colpire gli oggetti, cosa stavano traguardando tali raggi durante il periodo in cui il bagliore rimaneva sulla retina? Era chiaro che questa possibilità non poteva avere ragione di esistere.

Alhazen ha un'importanza rilevante nello sviluppo delle teorie della visione per le numerose intuizioni e dimostrazioni, tuttavia il suo contributo di straordinaria fama in occidente avrà una diffusione molto più tardi. Il suo testo più conosciuto, il *De Aspectibus*, risvegliò, alla fine

del medioevo, l'interesse per l'ottica, la catottrica e la diottrica. Inoltre Alhazen per primo intuisce la natura proiettiva delle ombre affermando che quando i corpi opachi sono irradiati da una luce e le loro ombre appaiono sul suolo o su corpi opachi opposti ad essi, si troverà che queste ombre si estendono in modo rettilineo e si troverà che le aree in ombra sono quelle le cui distanze rettilinee dal corpo luminoso (la luce del quale è stata bloccata da queste zone) sono state intercettate dall'oggetto proiettante le ombre.

Il concetto di proiezione e di sbattimento dell'ombra è evidentemente conosciuto e assimilato da Alhazen, e per questo motivo può essere considerato tra i primi fondatori di questa scienza.

Anche se non ci sono pervenuti schizzi di Alhazen sulla questione della proiezione dell'ombra, la diffusione del suo testo potrebbe aver suscitato l'interesse degli studiosi del Rinascimento anche sul tema umbratile.

Uno dei fondamenti delle teorie della visione, cioè la natura rettilinea dei raggi luminosi, è anche l'ipotesi per la teoria delle ombre: ai raggi luminosi rettilinei corrispondono i raggi d'ombra nella teoria delle ombre che si propagano lungo linee rette fino alla intersezione con altre superfici.

Il metodo del tracciamento delle ombre ha evidentemente delle basi proiettive pertanto tale metodo si sviluppa, necessariamente, dopo la scoperta (o riscoperta) rinascimentale della prospettiva.

Non si possono considerare tutti i processi come separati poiché lo sviluppo dell'ottica ha determinato l'interesse per la rappresentazione della realtà che percepiamo attraverso l'organo della vista. La prospettiva nasce dalla consapevolezza che alcuni raggi (in questo caso visivi) del cono ottico, che uniscono l'occhio agli estremi degli oggetti, intersecano un quadro su cui si forma l'immagine prospettica. Ha poca importanza se il quadro è il foglio da disegno o uno degli strati interni dell'occhio.

Lo sviluppo delle teorie della visione si arresta nel momento in cui la scienza prospettica diventa il principale interesse di pittori e matematici, causando la distinzione tra *perspectiva naturalis* e *perspectiva*

artificialis. La prima troverà nuovi teorizzatori tra la fine del XVI sec. e inizio del XVII sec. ed ha come maggiore esponente Kepler con la sua ipotesi dell'immagine retinica della realtà.

La seconda avrà sviluppi differenti, diversificati in più discipline tra cui anche quella della teoria delle ombre e del chiaroscuro.

Lo sviluppo della teoria delle ombre è posteriore alla *perspectiva artificialis*: la possibilità che due centri proiettivi potessero coesistere in uno stesso disegno non rispecchiava la visione tutta oculocentrica dei primi teorici del Rinascimento.

Tuttavia Leonardo da Vinci nel Codice C raffigura le due rappresentazioni in un unico schizzo, mostrando l'analogia proiettiva della proiezione prospettica e della proiezione umbratile: un cono ottico o un cono ombroso, con vertice rispettivamente nell'occhio o in una candela, investono un oggetto e lo proiettano su una superficie.

Nel codice C e nel *Trattato di Pittura*, edito da Francesco Melzi, Leonardo analizza in maniera approfondita le ombre e il chiaroscuro, non solo considerando problemi di rappresentazione, ma mostrando una certa dimestichezza anche nella genesi umbratile. Pur non fornendo una tecnica sulla genesi proiettiva delle ombre, Leonardo conosce il modo per costruirle, negli schizzi come nei suoi splendidi quadri.

I numerosi schemi sul modo di costruire e rendere la penombra palesano la sua ossessione per la tecnica dello sfumato, splendidamente espressa nei dipinti e analizzata a pieno solamente alla fine della sua carriera, quando Leonardo utilizza nei suoi schemi non più una luce artificiale ma l'intera calotta celeste.

La prima rappresentazione geometrica dell'ombra si ritrova nel testo di Albrecht Dürer, uno schema semplice di un cubo sotto la luce solare. In realtà la sorgente luminosa è sbagliata, perché nonostante Dürer la rappresenti come il sole, essa è una sorgente posta a distanza finita, piuttosto vicina al solido. L'errore del fiammingo provoca non pochi errori nelle trattazioni successive.

Lo sviluppo della teoria delle ombre passa attraverso errori banali ed approssimazioni che ne rallentano il processo.

Molti trattatisti confondono il sole, sorgente di luce convenzionalmente

considerata all'infinito, che genera raggi luminosi paralleli, con una candela che invece genera un cono luminoso; la rappresentazione prospettica della prima rimane irrisolta fino alla trattazione di Nicéron, a parte la parentesi del Cigoli, il cui trattato rimane però inedito.

In altri trattati le ombre portate sono appena accennate, celando il metodo usato dagli autori per tracciarle e rappresentarle. A volte la genesi proiettiva dei punti ombra generati dalla sorgente luminosa è del tutto arbitraria: il risultato finale, la composizione della tavola, e l'impatto nell'osservatore hanno la precedenza sulla costruzione geometrica esatta delle ombre e della prospettiva. Altre volte si riscontrano banali approssimazioni delle sorgenti di luce, in particolar modo quelle estese come possono essere finestre e porte.

La trattazione più completa sull'argomento è quella di Jean François Nicéron nell'appendice *De Lumine et Umbris* del Secondo Libro del *Thaumaturgus opticus* (1646). In essa troviamo tutte le tipologie di proiezioni umbratili come ancora oggi si studiano.

Dopo Nicéron, in effetti, si riscontrano solo altri due grandi passi evolutivi nel campo di ricerca: il primo è rappresentato dalla formulazione della legge di Lambert dall'omonimo studioso, che lega l'intensità luminosa di una superficie al coseno (funzione trigonometrica) dell'angolo formato tra direzione della luce e normale alla superficie; il secondo è lo studio sistematico di tale legge eseguito da Domenico Tessari (1880) per poter rappresentare la tonalità delle superfici diversamente inclinate rispetto all'andamento della luce.

Potremmo aggiungere anche il contributo di Giuseppe Peri per la rappresentazione della prospettiva aerea, cioè della rappresentazione degli oggetti sempre più distanti dal punto di vista, ma in fondo lo stesso tema era stato trattato in modo sistematico anche da Leonardo e lui stesso aveva dato prova della sua capacità di rappresentarlo in molti tra i suoi più famosi dipinti.

La vera e grande innovazione, dal Tessari ad oggi, avviene solo in tempi recenti, con la computer grafica che utilizzando appropriati algoritmi di calcolo riesce a rappresentare, seppur con le adeguate approssimazioni che tuttavia ha anche la pratica del disegno, le ombre

e i chiaroscuri in maniera realistica, o addirittura fotorealistica. Nella ricerca, la rappresentazione digitale è stata utilizzata come mezzo per studiare, elaborare e re-interpretare i testi storici, verificando se tali testi espongono concetti veritieri e se gli algoritmi di calcolo rappresentano verosimilmente la realtà, in un processo di verifica e confronto. A tale scopo doveva essere anche verificata la corrispondenza riferita alla realtà tra render attraverso e immagini fotografiche. Questo confronto è possibile se si sfruttano le moderne tecniche di computer grafica, che sono state pertanto analizzate ed applicate sui modelli digitali.

È interessante notare come i programmi di grafica attuali riescono a rendere chiaramente molte delle indicazioni che Leonardo aveva annotato nei suoi appunti. Ad esempio l'algoritmo Radiosity suddivide le superfici in piccole aree e calcola l'interazione che si crea tra esse (prendendone in considerazione due per volta) commisurata alla visibilità l'una dall'altra e alla distanza che intercorre tra le patch.

Questo algoritmo non è molto lontano concettualmente dalle analisi di Leonardo, il quale determinava la tonalità delle zone d'ombra in base a quanta porzione di luce o di superficie riflettente esse riuscivano a raggiungere.

Lo strumento informatico è stato utilizzato anche per analizzare e capire alcune delle preposizioni di Alhazen del *De Aspectibus*. L'assenza di schemi geometrici dell'autore è stata colmata con la realizzazione di modelli digitali renderizzati seguendo pedissequamente il testo originale.

Il disegno digitale è invece servito per analizzare, di volte in volta, quando necessario, i numerosi schemi e costruzioni proposte dai trattatisti nel corso dei secoli.

Lo studio si è proposto quindi di ricucire lo sviluppo del percorso delle teorie delle ombre e del chiaroscuro attraverso i secoli, grazie a una rilettura dei trattati in cui l'argomento è analizzato.

Lo studio dei singoli trattati ha permesso non solo di determinare il percorso seguito, attraverso le innovazioni e gli errori, ma anche, e

contemporaneamente, le relazioni con i moderni algoritmi dei programmi di renderizzazione.

Al di là delle possibili similitudini la questione veramente importante è che, soprattutto nel nostro campo, la componente tecnologica deve essere strumento della storia, per capire, studiare e indagare.

Soprattutto le moderne tecniche, proprio perché recenti e in evoluzione, hanno bisogno di confutazioni e sperimentazioni continue per essere affinate e avallate proprio attraverso lo studio dei testi antichi avvalendosi dello strumento informatico anche come laboratorio di sperimentazione virtuale. A tal fine una collaborazione interdisciplinare tra studiosi di storia della scienza e informatici, grafici, eidomatici, architetti e ingegneri, ognuno con le proprie e legittime competenze, garantirebbe lo sviluppo nella ricerca in questo settore.

Infatti, se la geometria descrittiva diventò, nella storia, scienza matematica dopo esser stata nelle mani dei pittori, oggi essa può essere disciplinata da altre e nuove leggi.

A fronte della geometria comunemente insegnata, esiste un'altra geometria, applicata dagli informatici alla base degli algoritmi di calcolo per i programmi di renderizzazione.

La conoscenza degli algoritmi è fondamentale per lo sviluppo della rappresentazione eidomatica, studiata e applicata da informatici, architetti ed ingegneri, per una geometria descrittiva attualizzata.

