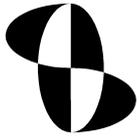


DISPENSE DI

PROGETTAZIONE OTTICA
PROGETTAZIONE DI STRUMENTI OTTICI

Cap.5 – STRUMENTI OTTICI

Ing. Fabrizio Liberati



Cap. 5 STRUMENTI OTTICI

Gli strumenti ottici utilizzati direttamente dall'occhio umano, cioè senza la presenza di display, pellicole o altro, sono costituiti essenzialmente da un obiettivo e da un oculare. A seconda dei casi possono essere presenti altri componenti ottici necessari per il trasporto dell'immagine o per il suo corretto orientamento. In ogni caso l'obiettivo forma l'immagine e l'*oculare* la ingrandisce presentandola in modo adeguato anche da un punto di vista ergonomico. In figura 5.1 sono rappresentati gli elementi essenziali di un tipico strumento ottico.



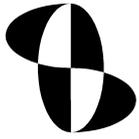
Figura 5.1

Degli obiettivi si è già detto nel capitolo precedente. Vediamo ora come sono costituiti alcuni strumenti ottici ed i loro componenti.

5.1 Oculari

Gli oculari svolgono la funzione di una lente di ingrandimento più o meno sofisticata a seconda della classe dello strumento e del campo di vista da proiettare. Anziché focalizzare un fascio di luce come la maggior parte dei sistemi ottici, l'oculare collima l'immagine generando da ciascun punto immagine un fronte d'onda piano. Infatti l'occhio nella visione normale è abituato ad osservare oggetti a grande distanza, e quindi a focalizzare sulla retina fronti d'onda piani o leggermente convessi. A seconda della vista dell'osservatore, la regolazione diottrica consente di generare fronti d'onda concavi o convessi.

Dal punto di vista dello schema ottico, l'oculare è atipico poiché la pupilla è posta esternamente al sistema. La pupilla di uscita è la posizione in cui deve essere posto l'occhio per una visione corretta e non oscurata dell'immagine. Utilizzando uno strumento ottico si tende istintivamente a mettere l'occhio in corrispondenza della pupilla di uscita. Di solito il diaframma di apertura del sistema ottico è posto in corrispondenza dell'obiettivo e la pupilla di uscita, che ne è l'immagine, deve formarsi abbastanza lontano dall'oculare in modo da permettere un comodo e sicuro posizionamento dell'occhio. Si definisce *emergenza pupillare (eye relief)* la distanza misurata lungo l'asse ottico tra l'ultima lente dell'oculare e la pupilla di uscita. L'emergenza pupillare dovrebbe essere sempre di almeno 15mm; 20mm occorrono in caso di campi estesi e anche molti di più nel caso di sistemi soggetti a



spostamenti repentini (rinculo di armi nel caso di mirini o altro). Non sempre questa regola viene seguita, sia per motivi di ingombro ed economici (a parità di campo angolare, le dimensioni delle ottiche crescono con l'emergenza pupillare), sia commerciali: per ottenere sistemi ottici con forti ingrandimenti (requisito molto ricercato anche se non sempre effettivamente utile) occorre diminuire la focale dell'oculare e riducendo in questo modo anche la dimensione e la distanza della pupilla di uscita.

5.2 Telescopi

Il *telescopio* è il tipico strumento ottico. E' costituito dagli elementi essenziali, cioè da obiettivo ed oculare ed ha la pupilla di ingresso in corrispondenza dell'obiettivo. Il sistema dallo schema più semplice come quello riportato in figura 5.2 va bene per applicazioni astronomiche ma non è adatto per osservazioni "terrestri" in quanto l'immagine osservata risulterebbe capovolta. Infatti i raggi rossi provenienti da un oggetto posizionato in alto dopo aver attraversato il sistema sono visti dall'occhio posto sulla pupilla di uscita come se provenissero dal basso.

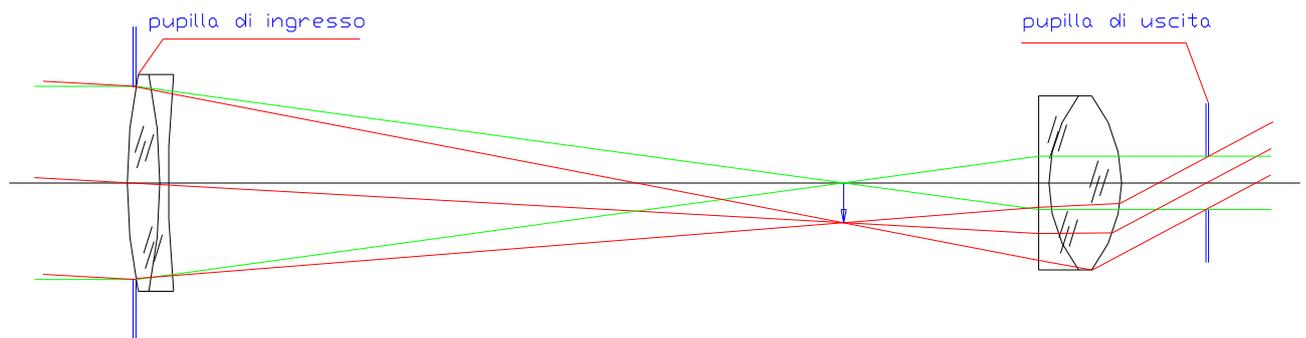


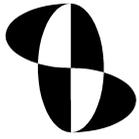
figura 5.2

Il sistema ottico produce un ingrandimento di tipo angolare nel senso che l'angolo che i raggi formano con l'asse ottico in ingresso sono amplificati in uscita, cosicché l'osservatore vedrà la scena ingrandita. La dimensione h dell'immagine formata dall'obiettivo di focale F da un oggetto che sottende un angolo α rispetto all'asse ottico è data dal prodotto di F per la tangente dell'angolo α (formula 1.7). Se f è la focale dell'oculare, l'angolo di uscita β sarà tale che $h = f \cdot \tan \beta$. Pertanto sarà:

$$F \cdot \tan \alpha = h = f \cdot \tan \beta \quad (5.1)$$

L'ingrandimento angolare M varrà perciò:

$$M = \beta / \alpha \cong \tan \beta / \tan \alpha = F / f \quad (5.2)$$



L'approssimazione di trascurare le focali è lecita in quanto di solito gli angoli sono piccoli. Dalla similitudine dei triangoli formati dai raggi marginali assiali, si vede come il rapporto tra le focali sia pari a quello tra i diametri delle pupille.

$$M = F / f = D / d \quad (5.3)$$

Pertanto il rapporto di ingrandimento per un telescopio è pari al rapporto tra le focali di obiettivo e oculare, ovvero al rapporto tra le pupille di ingresso e di uscita.

Dalla figura, seguendo il percorso di un raggio rosso e di uno verde, si vede pure come la pupilla di uscita sia effettivamente l'immagine della pupilla di ingresso prodotta dalle ottiche che la seguono, ossia dall'oculare.

5.4 Binocoli

I binocoli sono due telescopi a canali paralleli per osservazione ingrandita di oggetti più o meno lontani con due occhi. Il problema dell'immagine capovolta viene risolto con l'introduzione di prismi: due prismi di Porro per ciascun canale nello schema classico (come in figura 5.3) o un prisma doppio di Pechan nei binocoli compatti. Il prisma di Porro capovolge l'immagine in una direzione, alto-basso o destra-sinistra, e pertanto ne occorrono due, mentre il prisma di Pechan, è pure costituito da due prismi, di cui uno a tetto.

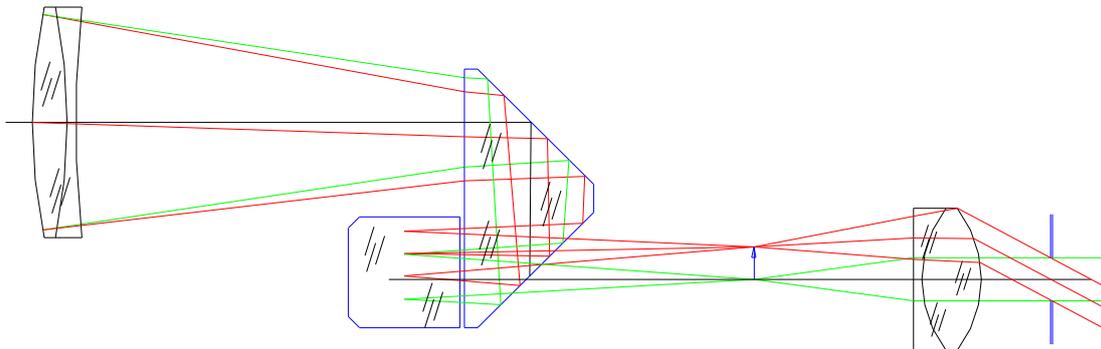
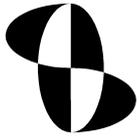


figura 5.3

5.5 Microscopi

Il *microscopio* è un altro schema ottico classico. La figura 5.4 ne mostra uno schema tipico. L'immagine è capovolta e normalmente non viene rigirata. L'ingrandimento non può essere definito angularmente, come per telescopi o binocoli, in quanto l'oggetto non si trova a grande distanza, ma come rapporto tra la visione che se ne ha attraverso il sistema ottico e quella che si avrebbe guardando l'oggetto direttamente. A questo proposito, per convenzione si assume che la visione di un oggetto di piccole dimensioni per un occhio normale rilassato avvenga ponendo l'oggetto alla distanza di 250mm. L'ingrandimento viene effettuato in due stadi: un primo ingrandimento è dato dall'obiettivo, che produce una immagine ingrandita dell'oggetto (si veda la figura 5.4); un secondo dall'oculare, funzionante come lente di ingrandimento.



OPTO SERVICE srl

Per come è fatto, l'obiettivo potrebbe produrre immagini di dimensioni molto diverse tra loro allontanandolo o avvicinandolo anche di pochissimo dall'oggetto. Per convenzione si è stabilito di definire l'ingrandimento dell'obiettivo quello che corrisponde ad una distanza oggetto-immagine di 180mm. Questo è l'ingrandimento che troviamo inciso sugli obiettivi da microscopio e per il quale l'obiettivo è stato ottimizzato, ma, come detto, l'ingrandimento che è possibile ottenere può anche essere molto diverso.

Il secondo stadio di ingrandimento è pure una convenzione e, per quanto detto sopra, si ottiene dividendo 250mm per la distanza focale dell'oculare. Anche questo valore si trova scritto generalmente sugli oculari.

L'ingrandimento complessivo è il prodotto dei due valori parziali.

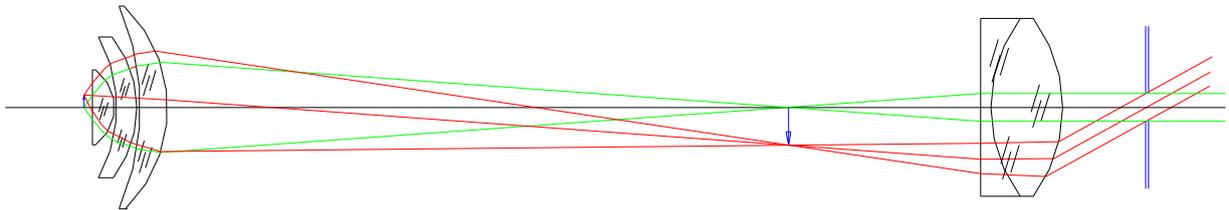


figura 5.4

5.6 Periscopi

Il *periscopio* è un canale ottico che permette l'osservazione di oggetti non accessibili direttamente. L'utilizzo classico è quello sottomarino, ma sono frequenti altre applicazioni analoghe. Per poter contenere le dimensioni dell'immagine e della pupilla, è necessario ricorrere al trasporto attraverso il percorso ottico dell'immagine e della pupilla. Avremo pertanto più immagini e pupille intermedie. Normalmente l' $F\#$ è alto, pertanto non ci sono grossi problemi di aberrazioni. Le difficoltà maggiori riguardano gli aspetti relativi alle tolleranze ed in generale quelli di tipo ingegneristico.

Per applicazioni su piccola scala al posto dei periscopi vengono usati *endoscopi a fibre ottiche coerenti*, che permettono il trasporto dell'immagine pixel per pixel e trovano largo impiego in microchirurgia e nei campo dei collaudi.