

Geometrie ottiche e profondità di campo nelle fotocamere reflex digitali

A CURA DI MARCELLO MELIS

www.nital.it

Introduzione Richiami di ottica geometrica

Dimensione del sensore, lunghezza focale e angolo di campo

Messa a fuoco, fuori fuoco e diaframma

Foglio di calcolo della profondità di campo

Richiami di ottica geometrica

Obiettivi Perspective Control PC-E Nikkor e supporto Jumbo MultiBigShoot

Cerchio di confusione e profondità di campo

Conclusioni

Tutti i diritti sono riservati.

Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta senza l'autorizzazione scritta dell'autore e dell'editore (Nital S.p.A.) con qualsiasi mezzo di riproduzione, meccanico o elettronico.

Nomi e marchi citati nel testo sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive aziende.

Questo documento PDF è un articolo (eXperience) della newsletter Feel Nikon, edita da Nital S.p.A.

Comitato di redazione

Giuseppe Maio, Michele DiFrancesco, Marco Rovere

Progettazione e impaginazione

*Luca Scarano, Antonio Fenuta, Stefano Mancini
per Advision srl Verona. www.ad-vision.it*

Introduzione

Nel mondo delle reflex il passaggio dalla pellicola al digitale ha segnato una vera e propria rivoluzione, da una parte introducendo concetti estranei al fotografo tradizionale, come workflow, gestione dei dati, formati digitali, tanto per citarne alcuni, dall'altra apportando modifiche a concetti più consueti, come la [sensibilità o come la grana](#), che nel digitale diventa "rumore" e che ha un'origine fisica completamente diversa ma alla fine ha un effetto simile.

La profondità di campo "PDC" è uno dei concetti i cui principi sono rimasti immutati, ma, proprio per la diversità di tecnologia, è diventato più sfuggente e più difficilmente quantificabile.

In questo eXperience ripercorreremo prima i passi principali che portano a definire la PDC, e poi vedremo come la tecnologia digitale, ovvero la sostituzione della pellicola con sensori a diverse risoluzioni, ha portato a dover definire la PDC non solo in base a lunghezza focale e diaframma, come eravamo abituati prima, ma anche in base alle caratteristiche del sensore.

Richiami di ottica geometrica

Per arrivare a definire la PDC iniziamo dall'ottica geometrica, ovvero da quella semplificazione dell'ottica che prevede l'uso di lenti sottili che non introducono aberrazioni sferiche significative. In assenza di aberrazioni queste lenti permettono quindi di ottenere da un soggetto una immagine la cui nitidezza è la massima teorica possibile ed è limitata solo dalla [lunghezza d'onda della luce](#) utilizzata (messa a fuoco perfetta).

Inoltre non terremo conto della aberrazione cromatica, fenomeno che si verifica in presenza di luce composta da [radiazioni a diverse lunghezze d'onda](#). In pratica la trattazione è valida per una [luce monocromatica](#) (tipo laser), ma poi grazie alla linearità del mezzo e per sovrapposizione degli effetti è estensibile a luce bianca come somma di molte radiazioni monocromatiche.

Nel seguito parleremo di lenti o di obiettivi in modo intercambiabile, perché ai fini della descrizione della PDC e della sua misura avere una singola lente oppure gruppi di lenti con un potere ottico equivalente è sostanzialmente la stessa cosa.

Caratterizzazione di una lente

Una lente si caratterizza attraverso la sua *lunghezza focale* e la sua *apertura relativa*.

Lunghezza focale

La lunghezza focale è la distanza focale alla quale viene messa a fuoco l'immagine di un soggetto posto distanza infinita. Se, ad esempio, lasciamo passare la luce del sole attraverso una lente, dal lato opposto l'immagine del sole si metterà a fuoco ad una distanza focale pari alla lunghezza focale.

Nella Fig 1 viene mostrata una lente con lunghezza focale pari a 0.5 (in unità arbitrarie). La lente è nella posizione $x=3$.

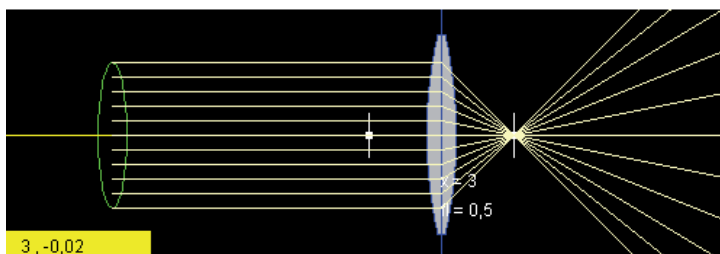


Fig. 1: Lunghezza Focale

Se il soggetto non è posto all'infinito, minore è la sua distanza dalla lente, più lontana dalla lente si formerà la sua immagine. Se S_f è la distanza del soggetto a fuoco e con I_f indichiamo la distanza alla quale si forma l'immagine oltre la lente, cioè la distanza focale, e con L è la lunghezza focale, vale la formula

$$1/S_f + 1/I_f = 1/L$$

che mette in relazione la lunghezza focale L con le distanze del soggetto e della sua immagine dalla lente.

Nelle figure che seguono la lente ha sempre lunghezza focale $L=0,5$ (unità arbitrarie) ed il centro della lente è ad $x=3$.

In Fig 2 il soggetto è ad $x=0,5$ quindi a distanza $S_f=2,5$ dalla lente. Secondo la formula avremo $I_f = 1/(1/L - 1/S_f) = 0,62$. Quindi l'immagine del soggetto si forma ad una distanza focale $I_f=0,62$, cioè sul piano focale posto ad $x=3,62$.

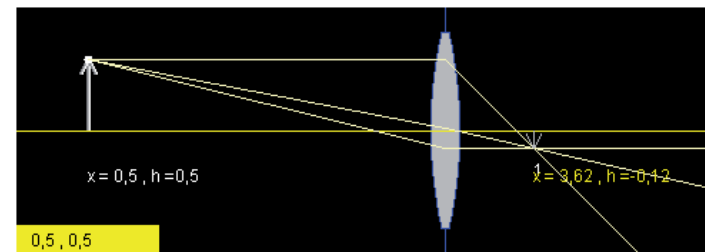


Fig. 2: Distanza soggetto lontano e distanza focale

Nella figura Fig 3 il soggetto è più vicino alla lente ($x=1$ cioè $S_f=2$). Applicando la formula si trova che $I_f=0,66$ e l'immagine si forma ad $x=3,66$, a distanza quindi superiore rispetto a prima.

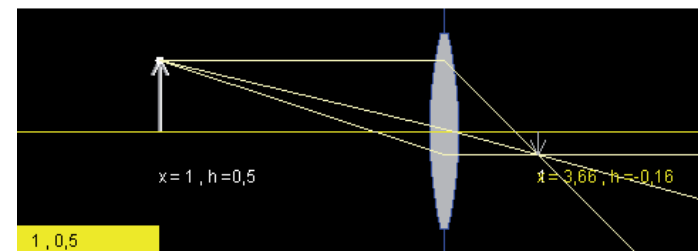


Fig. 3: Distanza soggetto vicino e distanza focale

In teoria la distanza minima alla quale può arrivare il soggetto rispetto alla lente e che permette il formarsi di una immagine, è proprio la lunghezza focale, ma questo comporterebbe una immagine formata proiettata all'infinito. Nella pratica la distanza minima di messa a fuoco è dettata dalla escursione massima della lente rispetto al sensore. Più la lente può allontanarsi dal sensore (maggiore è I_f) più vicino può stare il soggetto (minore è S_f).

Apertura relativa

L'altro parametro che caratterizza una lente, o un obiettivo con il suo completo schema ottico ed il suo diaframma, è l'apertura relativa, anche espressa con il simbolo $f/$, che rappresenta il rapporto tra la lunghezza focale ed il diametro del diaframma.

$$f/ = L / DD$$

con L = lunghezza focale e DD = diametro del diaframma.

Uguualmente si può scrivere:

$$DD = L / f/$$

Un obiettivo, ad esempio, con lunghezza focale 105mm, e con una apertura relativa impostata su f/2.8 presenterà un diaframma di $105/2.8 = 37.5\text{mm}$ di diametro.
Vale la pena ricordare la progressione dei valori standard di apertura relativa:

f/1, f/1.4, f/2, f/2.8, f/4, f/5.6, f/8, f/11, f/16, f/22, f/32, f/44, f/64

dove f/1 rappresenta l'apertura relativa più luminosa.

I valori di questa scala sono distanziati di 1 stop, ovvero di quella differenza di esposizione che corrisponde ad un raddoppio del flusso di luce (+1 stop) o ad una riduzione alla metà del flusso di luce (-1stop).

Se ad esempio prendiamo un obiettivo con lunghezza focale di 50mm, dall'apertura relativa possiamo ricavare il diametro del diaframma:

$$DD = 50\text{mm} / f/$$

La metà del diametro corrisponde al raggio Ra dal quale possiamo calcolare l'area del diaframma, cioè la superficie attraverso la quale il diaframma fa passare la luce

$$\text{Area} = Ra^2 \times \pi \quad (\pi = \text{pi greco} = 3,1415\dots)$$

Obiettivo con lunghezza focale di 50 mm		
f/2	diametro = 25.00mm	area = 490.6 mm ²
f/2.8	diametro = 17.85mm	area = 250.3 mm ²
f/4	diametro = 12.50mm	area = 122.6 mm ²
f/5.6	diametro = 8.92mm	area = 62.5 mm ²

Si vede quindi come la progressione delle aperture relative corrisponda ad aree che ad ogni passo si dimezzano riducendo quindi di uno stop l'esposizione ("passa" la metà della luce).

Apertura relativa effettiva

L'apertura relativa stampigliata sul corpo dell'obiettivo è quella nominale, ovvero è l'apertura relativa che l'obiettivo presenta quando la messa a fuoco è all'infinito e la distanza focale coincide con la lunghezza focale.

Ma abbiamo visto che all'avvicinarsi del soggetto il piano focale sul quale si forma la sua immagine si allontana dalla lente, cioè la distanza focale Df aumenta. Questo ha una conseguenza sulla luminosità perché, a parità di diametro del diaframma (DD) il rapporto distanza focale/diametro del diaframma cambia, aumentando (ovvero muovendosi verso aperture relative con numero maggiore, quindi con minore luminosità).

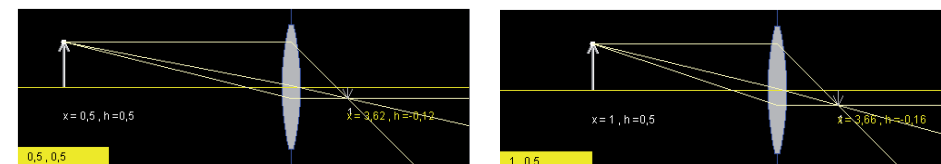
L'apertura relativa effettiva $f_e/$ si può calcolare partendo dalla distanza focale lf e dal diametro del diaframma DD:

$$f_e/ = lf/DD$$

oppure dall'apertura nominale f/ e dal rapporto di ingrandimento (di seguito definito):

$$f_e/ = (1 + 1/R) * f/$$

Rapporto di ingrandimento



Dagli schemi molto semplici delle Fig 2 e Fig 3 già visti in precedenza, possiamo ricavare anche un altro importante parametro legato alla lunghezza focale ed alla distanza del soggetto: il rapporto di ingrandimento R.

Questo è il rapporto tra dimensione dell'immagine HI e la dimensione del soggetto HS:

$$R = HI/HS$$

Nelle figure l'altezza del soggetto è sempre h=0.5, invece l'altezza della sua immagine cambia ed aumenta all'avvicinarsi del soggetto alla lente.

Il rapporto tra le due altezze HI/HS, cioè il rapporto di ingrandimento R, risulta essere uguale al rapporto tra la distanza focale e la distanza del soggetto a fuoco, cioè

$$R = lf/Sf$$

Facciamo un esempio: fotografiamo un oggetto alto un metro (HS = 1000 mm) alla distanza di 5 metri (Sf = 5000 mm) con un obiettivo con lunghezza focale L=100 mm. Per prima cosa possiamo calcolare lf attraverso la formula già usata:

$$lf = 1/(1/100 - 1/5000)$$

ed otteniamo $f=102$ mm. Questo vuol dire che l'immagine del soggetto verrà a fuoco su un piano a 102 mm dalla lente (oppure a 2 mm oltre la sua lunghezza focale). Il rapporto di ingrandimento sarà quindi $R = f/Sf = 0.0204$ ovvero circa 1/50. L'immagine del soggetto sul sensore sarà quindi grande $HI = 1000/50 = 20$ mm.

Dimensione del sensore, lunghezza focale e angolo di campo

Se stiamo usando una fotocamera con sensore [Nikon FX 24x36 mm](#), l'immagine del soggetto dell'esempio precedente, alta $HI = 20$ mm, entrerà completamente all'interno delle dimensioni del fotogramma, sia con inquadratura orizzontale che con inquadratura verticale.

Se stiamo usando invece una fotocamera con sensore DX che ha dimensioni 23.6 x 15.8mm, sarà necessario scattare la foto in verticale per inquadrare tutto il soggetto.

Vale la pena sottolineare che nei due casi, quello con sensore FX e quello con sensore DX, a parità di lunghezza focale e di distanza del soggetto, *il rapporto di ingrandimento ottico non cambia*. Quello che cambia è l'angolo di campo visibile attraverso i due sensori, che nel caso di sensore DX è inferiore.

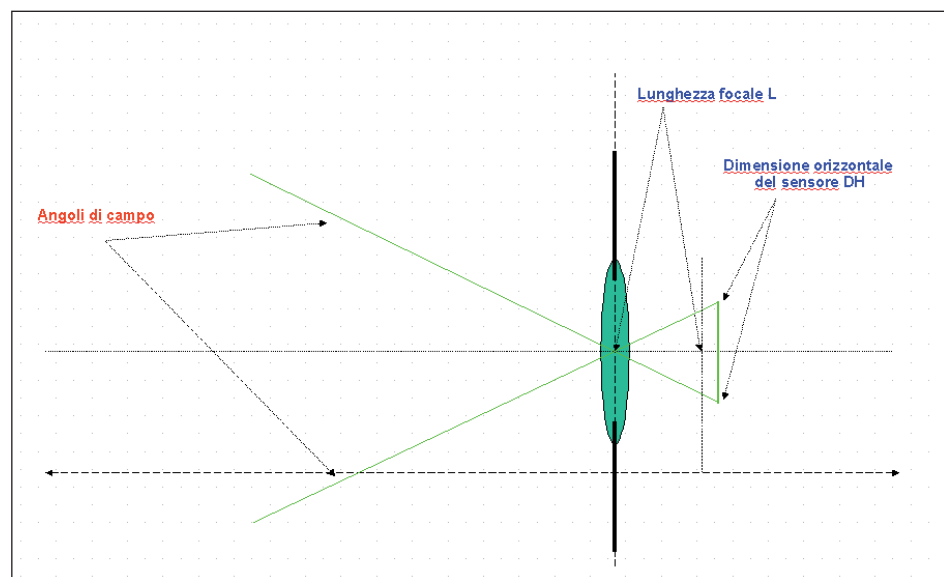


Fig 4: angolo di campo e sensore FX

È possibile calcolare l'angolo di campo (o di apertura) in funzione della lunghezza focale L e della dimensione della diagonale D_s del sensore. L'angolo di campo A_c (in gradi) sarà uguale a:

$$A_c = 2 * \arctan(D_s/(2*L)) * 180 / \pi \quad (\pi = \text{pi greco} = 3,1415\dots)$$

Ad esempio, montato su fotocamera con sensore FX la cui diagonale è:

$$D_s = \sqrt{(24*24 + 36*36)} = 43.26 \text{ mm}$$

un obiettivo con lunghezza focale $L=105$ mm fornirà un angolo di campo pari a:

$$A_c = 2*\arctan(43.26/210)*180 / \pi = 23.2^\circ$$

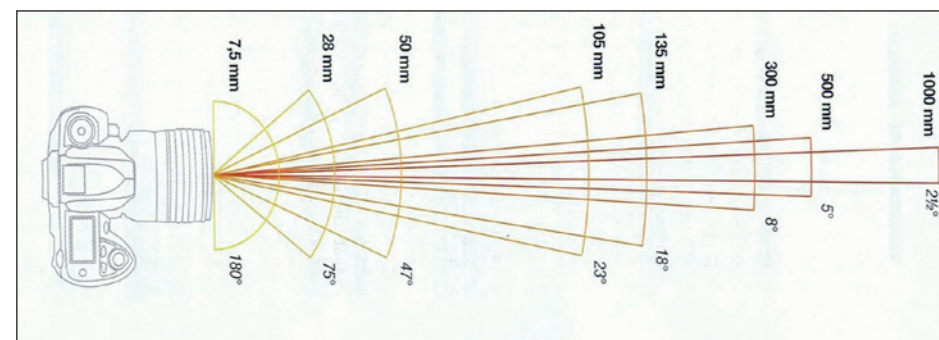


Fig 5: angoli di campo e lunghezze focali

Viene detto spesso che una certa focale montata su sensore DX equivale ad una focale pari a quella originale moltiplicata di un certo fattore (in formato Nikon DX il fattore costante è pari a circa 1.5). Ma questo vale, come abbiamo già detto, solo per l'angolo di campo e non per il rapporto di ingrandimento ottico. Se però i due sensori hanno lo stesso numero di pixel, allora visualizzando entrambe le immagini al 100% di ingrandimento su di un monitor l'effetto sarà quello di avere, da un sensore DX, una immagine più ingrandita, "come se" fosse stata presa con un obiettivo a lunghezza focale maggiore. Nella Fig 6 il sensore DX viene proiettato ad una distanza sufficiente (linea rossa verticale tratteggiata) a renderlo grande quanto il sensore FX. Questa distanza è la lunghezza focale equivalente.

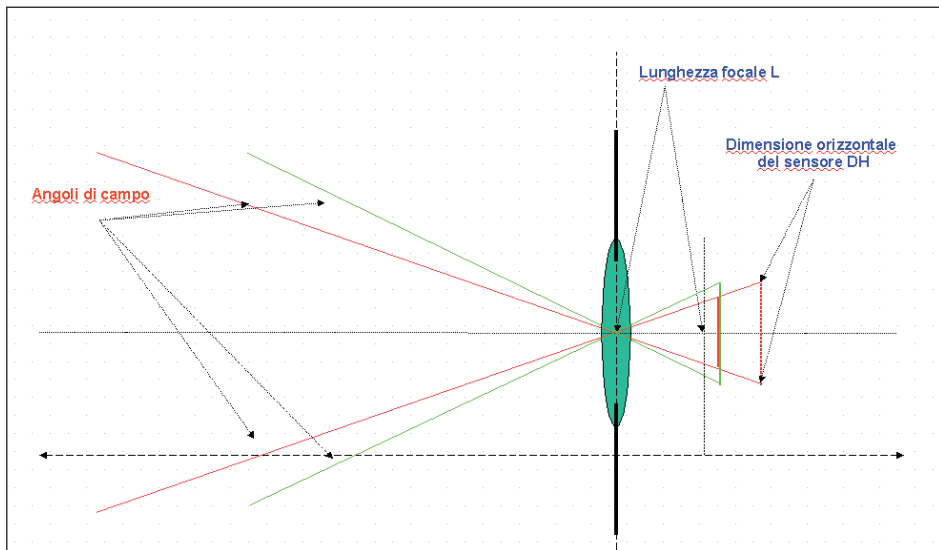


Fig 6: sensori FX e DX, angoli di campo e sensore DX equivalente

Ingrandimento 1:1

Stabilito che l'ingrandimento ottico (cioè quello dovuto alla lunghezza focale dell'obiettivo ed alla distanza del soggetto, e non alla dimensione e risoluzione del sensore) dipende solo dalla lunghezza focale dell'obiettivo, il rapporto di ingrandimento 1:1 si raggiungerà solo quando la distanza del soggetto Sf e la distanza focale lf saranno uguali. Ricordando che Sf e lf sono legati tra di loro attraverso la lunghezza focale dalla formula già citata, chiamando U il valore che lf ed Sf raggiungono quando sono uguali, possiamo trovare questo valore in funzione della lunghezza focale:

$$1/U + 1/U = 1/F \Rightarrow 2/U = 1/F \Rightarrow U = 2F$$

Cioè il rapporto di ingrandimento 1:1 si ottiene quando il soggetto, e di conseguenza la sua immagine, saranno ad una distanza dalla lente pari al doppio della lunghezza focale.

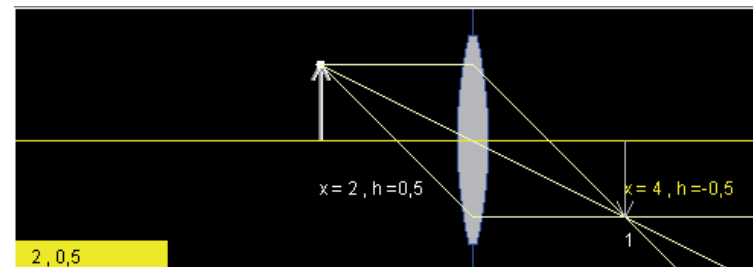


Fig. 4: Ingrandimento 1:1

Nella Fig 7 il soggetto è a distanza 1 dalla lente (la lente ha lunghezza focale 0.5) ed ugualmente la sua immagine è a distanza 1 dalla parte opposta. Le altezze di soggetto ed immagine sono uguali, cioè in rapporto di ingrandimento 1:1.

Obiettivi Perspective Control PC-E Nikkor e Jumbo MultiBigShoot

Gli obiettivi [PC-E Nikkor](#) offrono la possibilità di basculare e decentrare il gruppo ottico. Questi obiettivi, uniti al supporto [Jumbo MultiBigShoot](#) e tramite una coppia di scatti, permettono di effettuare riprese di architettura e still-life ad una [risoluzione quasi doppia](#) rispetto alle riprese normali. In pratica è come avere a disposizione un sensore di dimensioni realmente maggiori rispetto a quello originale. Per questa particolare combinazione corpo macchina, obiettivo e supporto, sono state sviluppate le seguenti tabelle che forniscono l'angolo di campo equivalente. La serie di obiettivi PC-E Nikkor è disponibile in tre lunghezze focali: [PC-E 24mm f/3.5D ED](#), [PC-E 45mm f/2.8D ED](#) e [PC-E 85mm f/2.8D ED](#). Per gli obiettivi a focale 24mm e 45mm sono state prese in considerazione riprese fatte con decentramento lungo il lato lungo del sensore e lungo il lato corto, e per ognuna sono stati calcolati il lato lungo, il lato corto e la diagonale equivalenti, dai quali poi, con la formula già vista, sono stati ricavati gli angoli di campo. La tabella che segue, completa i dati sugli angoli di campo calcolati, non contemplati nella [tabella Formati e Risoluzioni](#) del precedente eXperience Jumbo MultiBigShoot.

Lunghezza focale (mm)	Fotocamera DSLR	Orientamento Formato DSLR	Lato verticale equivalente (mm)	Lato orizzontale equivalente (mm)	Diagonale equivalente (mm)	Angolo di campo verticale (gradi)	Angolo di campo orizzontale (gradi)	Angolo di campo diagonale (gradi)
24	D3x e D700	FX Verticale	48	36	60	90	73,74	102,68
24	D3x e D700	FX Orizzontale	60	24	64,62	102,68	53,13	106,79
45	D3x e D700	FX Verticale	48	36	60	56,14	43,6	67,38
45	D3x e D700	FX Orizzontale	60	24	64,62	67,38	29,86	71,36
24	D300s	DX Verticale	39	24	45,79	78,19	53,13	87,3
24	D300s	DX Orizzontale	47	16	49,65	88,79	36,87	91,93
45	D300s	DX Verticale	39	24	45,79	46,86	29,86	53,94
45	D300s	DX Orizzontale	47	16	49,65	55,15	20,16	57,77

Messa a fuoco, fuori fuoco e diaframma

Consideriamo il caso di un punto di una scena perfettamente messa a fuoco. Abbiamo già detto che se il soggetto è a distanza S dalla lente, allora la sua immagine si formerà perfettamente a fuoco alla distanza focale

$$l = 1/(1/L - 1/S).$$

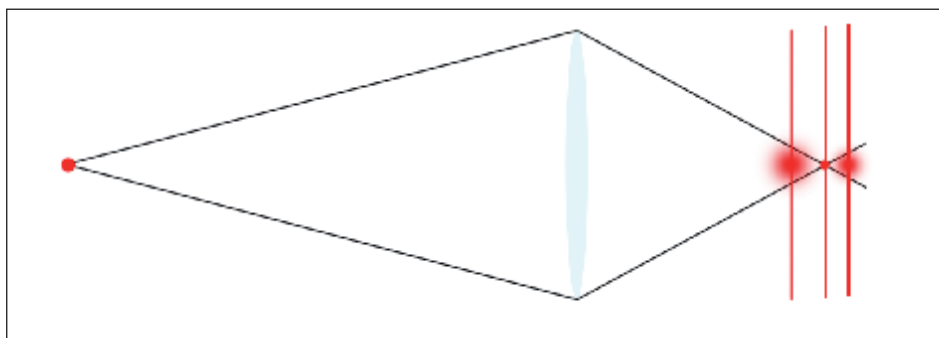


Fig. 5: Piani a fuoco e fuori fuoco

Se la messa a fuoco non è perfetta, cioè se la distanza tra lente e sensore è lievemente diversa dalla distanza focale, si otterranno immagini sfocate del punto originale, sia per un piano focale troppo vicino alla lente sia per uno troppo lontano, come si vede in figura.

Ma cosa succede se riduciamo il diaframma? Il fascio di luce che produce l'immagine sarà più stretto ed a parità di distanza dal piano focale perfettamente a fuoco, produrrà dei punti immagine sfocati di dimensioni minori rispetto a prima, come si vede nella figura che segue.

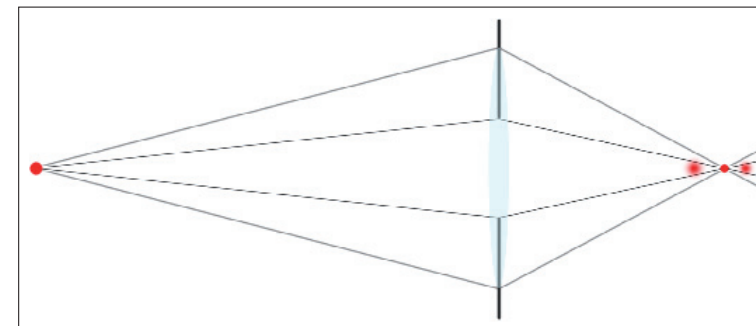


Fig 9: effetto del diaframma sulla messa a fuoco

Il caso estremo di questo meccanismo di riduzione dello sfocato dell'immagine in piani diversi da quello focale si ha con l'uso del [foro stenopeico](#).

Cerchio di confusione e profondità di campo

Nella ipotesi di obiettivo ideale, cioè in grado di mettere a fuoco una immagine senza introdurre alcuna deformazione o aberrazione e producendo una immagine estremamente nitida, quale è la risoluzione reale di un sensore? Cioè, quale è la dimensione minima che un sensore riesce a risolvere?

Abbiamo una certezza: sicuramente un sensore non sarà in grado di distinguere particolari dell'immagine di [dimensioni inferiori al pixel](#). Se [su un pixel](#) cadono due punti luminosi o uno solo di intensità pari alla somma dei due, il segnale prodotto dal pixel sarà esattamente lo stesso.

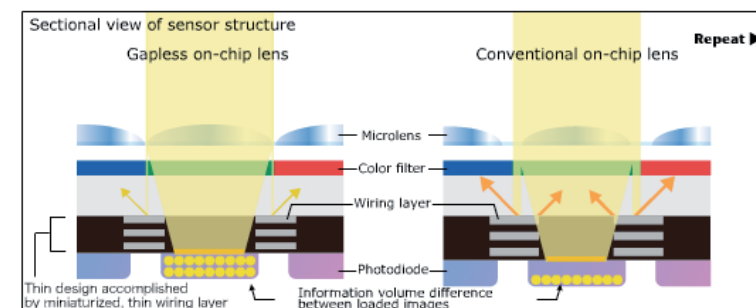


Fig 09 B: Schematizzazione della dimensione dei singoli pixel in questo esempio mostrato anche nelle variabili di microlenti. Fonte Nikon raggiungibile anche con animazione tra le pagine [Technology del sito Nikon.com](#)

Facendo crescere le dimensioni dei dettagli, o meglio allontanando tra loro due punti luminosi sul soggetto che producano due punti immagine sul sensore, inizialmente a distanza inferiore alle dimensioni del pixel, ma poi via via a distanza sempre maggiore, si arriverà al punto di notare, nell'immagine digitale prodotta dal sensore, due pixel distinti. Questi due pixel non potranno essere adiacenti, altrimenti non sapremmo mai se i punti del soggetto erano a loro volta adiacenti o distinti ma troppo vicini per essere distinti. Come poteva essere intuitivamente immaginabile servono almeno tre pixel per distinguere due punti. Per distinguere una serie di punti (ad esempio una serie di stanghe parallele di una ringhiera) è necessario che ci siano almeno due pixel per ogni stanga. Nella teoria dei segnali questo limite teorico viene chiamato Teorema del Campionamento di Nyquist citate e descritte anche nella sezione [Image Processing Algorithms](#) del sito Nikon: per rappresentare una struttura regolare costituita da N ripetizioni sono necessari almeno 2 volte N pixel.

Ma nella realtà difficilmente raggiungiamo questa definizione e la prima causa è la presenza, [davanti al sensore](#), del [filtro anti aliasing](#). Questo filtro (a volte detto passa basso perché taglia le frequenze spaziali superiori al limite di Nyquist impedendo così il fenomeno dell'aliasing) fa sì che in ultima analisi il dettaglio minimo richiede almeno tre pixel per essere catturato e distinto. Ciò che scende al di sotto di tre pixel comincia ad essere confuso, indistinto.

La necessità di questo filtro deriva anche dalla modalità con la quale si generano le tre componenti di colore di un pixel a partire dal Color Filter Array, o [matrice di Bayer](#). La matrice di Bayer determina, nel formato RAW/NEF, la registrazione di una sola componente di colore per ogni pixel, delegando ai pixel adiacenti il compito di fornire le altre due componenti di colore mancanti per arrivare alla modalità RGB. Per avere una adeguata coerenza cromatica nell'ereditare componenti di colore dai pixel adiacenti è necessario che a monte ogni punto dell'immagine venga diffuso (sfocato) anche sui due pixel adiacenti (in orizzontale ed in verticale).

A valle quindi di tutte queste considerazioni possiamo ragionevolmente definire una areola di tre pixel di diametro al di sotto della quale i dettagli non sono più distinguibili in modo netto. Chiamiamo questa areola **cerchio di confusione**.

Se non consideriamo l'obiettivo come un oggetto ideale, allora va tenuto conto anche della nitidezza ed incisione dell'obiettivo stesso. La misura della nitidezza di un obiettivo, in genere espressa con la **Modulation Transfer Function** "MTF", esula dai confini di questo articolo, e quindi non viene qua presa in considerazione, ma è importante ricordare che la profondità di campo è tanto maggiore quanto "peggiore" è la MTF.

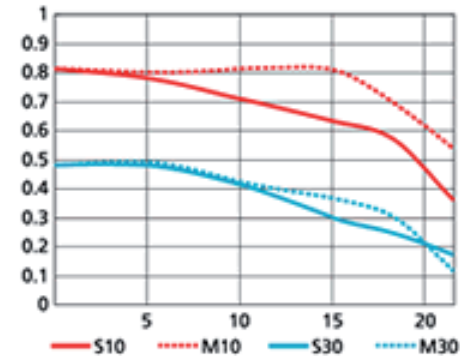
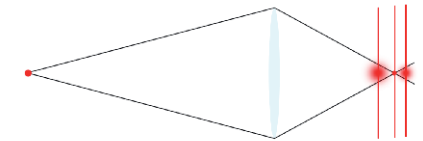


Fig 09 C:
 esempio di curve MTF
 in questo caso riferite all'obiettivo
 AF-S NIKKOR 50mm f/1.4G
 descritto anche nell'eXperience dedicato

Dalla Fig 8 che riportiamo nuovamente...

...si vede che allontanandosi dal piano focale l'obiettivo produce un punto dell'immagine sempre più sfocato e più largo, ma fino a quando le dimensioni del punto, pur sfocato, rientrano all'interno del cerchio di confusione, non c'è modo di percepire attraverso l'immagine catturata dal sensore se l'immagine stessa è a fuoco o meno. In altre parole il passo di campionamento spaziale, dell'immagine è maggiore del dettaglio sfocato.



Nella Fig 10 il soggetto principale si trova a distanza Sf dalla lente. Il cerchio di confusione, indicato con CC, è tale che un punto venga percepito con la stessa precisione di messa a fuoco dalla distanza focale lx fino alla distanza focale ly. Tra questi due piani il grado di sfocatura dell'immagine rimane sempre inferiore al cerchio di confusione per cui non viene percepito.

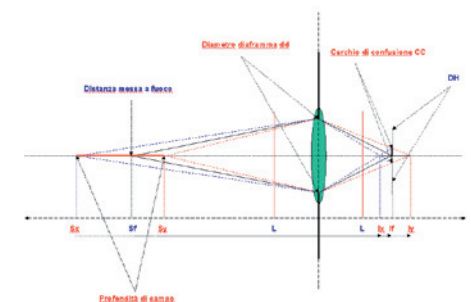


Fig 10: Cerchio di confusione e profondità di campo

Ma alle distanze focali lx ed ly, secondo la formula ormai più volte citata, corrispondono, dal lato del soggetto, le distanze Sx ed Sy. Tutto quello che viene posto tra queste due distanze risulterà quindi di nitidezza equivalente a quella di un soggetto alla esatta distanza di messa a fuoco Sf.

Tutto quello che è posto tra la distanza S_x e la distanza S_y apparirà nella immagine con lo stesso grado di messa a fuoco e la distanza tra S_x ed S_y viene detta **profondità di campo "PDC"**.

Se riduciamo il diaframma, gli angoli formati dalle linee tratteggiate rosse e blu si stringono e continuando a fare passare le linee per i margini del cerchio di confusione otterremo i punti di incrocio (l_x ed l_y) a distanze maggiori rispetto ad l_f . Corrispondentemente, dalla parte del soggetto, si allontaneranno tra di loro anche i punti S_x ed S_y , incrementando quindi la PDC.

Quando il punto di incrocio l_x arriva alla distanza L dalla lente, ovvero coincide con la lunghezza focale, il corrispondente punto S_x finisce all'infinito. In queste condizioni, cioè nelle condizioni di una PDC che include l'infinito, la distanza S_f viene detta anche distanza iperfocale ed inoltre il punto S_y si troverà a metà tra S_f e la lente.

La PDC dipende quindi da:

- dimensione del cerchio di confusione (aumenta al crescere del cerchio di confusione)
- apertura (aumenta con la riduzione del diametro del diaframma)
- distanza del soggetto (aumenta con la distanza del soggetto)

- lunghezza focale (aumenta al diminuire della lunghezza focale)

L'ultima dipendenza, quella dalla lunghezza focale, non è così evidente, anzi apparentemente, al diminuire della lunghezza focale gli angoli formati dai raggi che passano per i bordi del diaframma e convergono sul piano focale crescono, e verrebbe spontaneo pensare che "passano di meno" nel cerchio di confusione. In realtà entra in gioco un altro fattore che è quello del rapporto di ingrandimento: minore è la lunghezza focale, minore sarà il rapporto di ingrandimento (l_f/S_f) e minore sarà la dimensione dell'immagine del soggetto proiettata sul sensore. Senza aggiungere ulteriori formule, basti pensare che al diminuire della lunghezza focale diminuisce anche la dimensione di un dettaglio della scena e di conseguenza diminuisce anche la sua sfocatura in caso di soggetto fuori dal piano di messa a fuoco, facendolo rientrare nella tolleranza di fuoco dovuta la cerchio di confusione. Cosa analoga avviene con il mosso: con una focale corta il mosso si vede molto meno che con una focale lunga.

Foglio di calcolo della profondità di campo

Dagli argomenti sin qui trattati, si evince che la profondità di campo dipende ormai da un numero di parametri che non ne consentono più la stesura sotto forma di tabella, e tanto meno sotto forma di stampigliatura sull'obiettivo.

D'altra parte il suo calcolo non è immediato e richiede l'applicazione di nozioni di geometria e trigonometria. Esistono nel web diversi siti dove è possibile inserire alcuni parametri ed ottenere la profondità di campo corrispondente. L'[Autore](#) ha sviluppato un foglio di calcolo, disponibile su richiesta, che prevede come dati in input (campi in blu):

- dimensioni del sensore
- numero di pixel per lato
- dimensione del cerchio di confusione in pixel
- lunghezza focale
- diaframma utilizzato
- distanza del soggetto

e fornisce i dati calcolati per:

- dimensioni del pixel
- numero di megapixel
- diametro del diaframma
- superficie aperta del diaframma
- angolo di campo in gradi
- dimensioni del cerchio di confusione
- distanza minima a fuoco
- distanza massima a fuoco
- distanza iperfocale
- distanza minima a fuoco ad iperfocale
- tutti i dati metrici tra lente e sensore

Il foglio è a disposizione di chi ne fa richiesta per [e-mail](#) all'autore stesso.

Conclusioni

Questa esplorazione della **natura della profondità di campo** ci ha dato l'occasione per puntualizzare diversi concetti di ottica geometrica e per descrivere con un certo dettaglio come questi vengono applicati nel caso di sensori digitali.

Il fatto di trovare sul mercato fotocamere reflex con sensori digitali di dimensioni e soprattutto densità di pixel diverse obbliga a rivedere le indicazioni di profondità di campo che una volta erano stampigliate sugli obiettivi. Insieme alla profondità di campo anche altri fattori perdono la loro costanza, come ad esempio l'angolo di campo che non dipende più solo dalla lunghezza focale ma anche dalla dimensione del sensore. Se poi utilizziamo un obiettivo decentrabile in configurazione [Jumbo MultiBigShoot](#), si introduce una ulteriore variabile che è l'escursione del decentramento ottico cui corrisponde un fotogramma finale equivalente ed angolo di campo ottenibile normalmente solo su fotocamere medio formato.