



**Sommario**

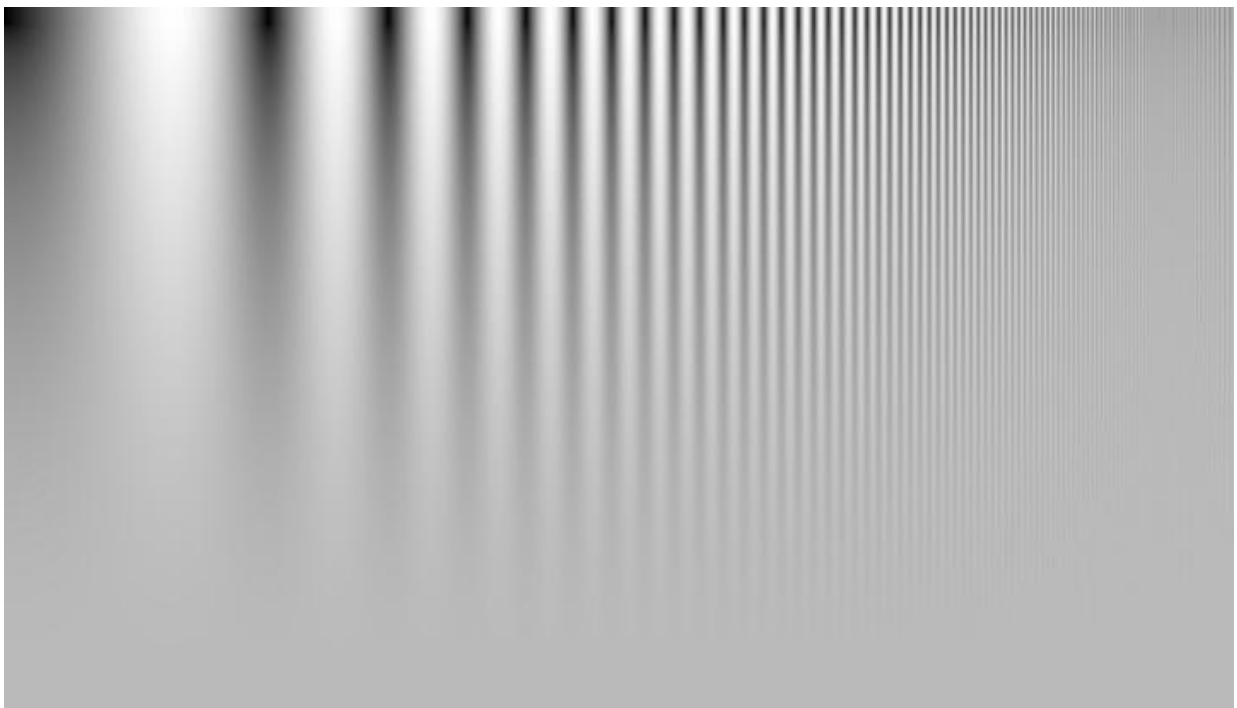
Risoluzione e contrasto.....2  
Funzione di trasferimento della modulazione .....6  
Diagramma MTF di obiettivi fotografici.....15  
Diagramma MTF di pellicole fotografiche .....20  
Acuità visiva umana .....23  
Stabilizzazione dell'immagine.....25  
Stabilizzazione ottica.....27  
Stabilizzazione elettromeccanica .....35  
Stabilizzazione elettronica .....41  
Stabilizzazione meccanica .....45  
Sensori giroscopici.....54

## Risoluzione e contrasto

---

Per il progettista ottico, il contrasto e la risoluzione sono in conflitto: se si aumenta l'uno diminuisce l'altra, e viceversa, ed i vari fabbricanti di obiettivi seguono differenti filosofie al riguardo. Storicamente, ad esempio, Zeiss progetta le sue ottiche optando per la massima risoluzione, mentre Leica propende per il massimo contrasto. Di conseguenza, le scelte di fondo che caratterizzano un marchio in fase di progettazione determinano, almeno in parte, la differente resa ottica dei suoi obiettivi rispetto alla concorrenza.

La risoluzione ed il contrasto sono inscindibilmente connessi. Si consideri una sequenza di linee bianche e nere alternate tra loro: ciò che permette di differenziarle è il loro contrasto. Se progressivamente si schiariscono le linee nere e si scuriscono quelle bianche, si arriva al punto di non riuscire più a distinguerle.

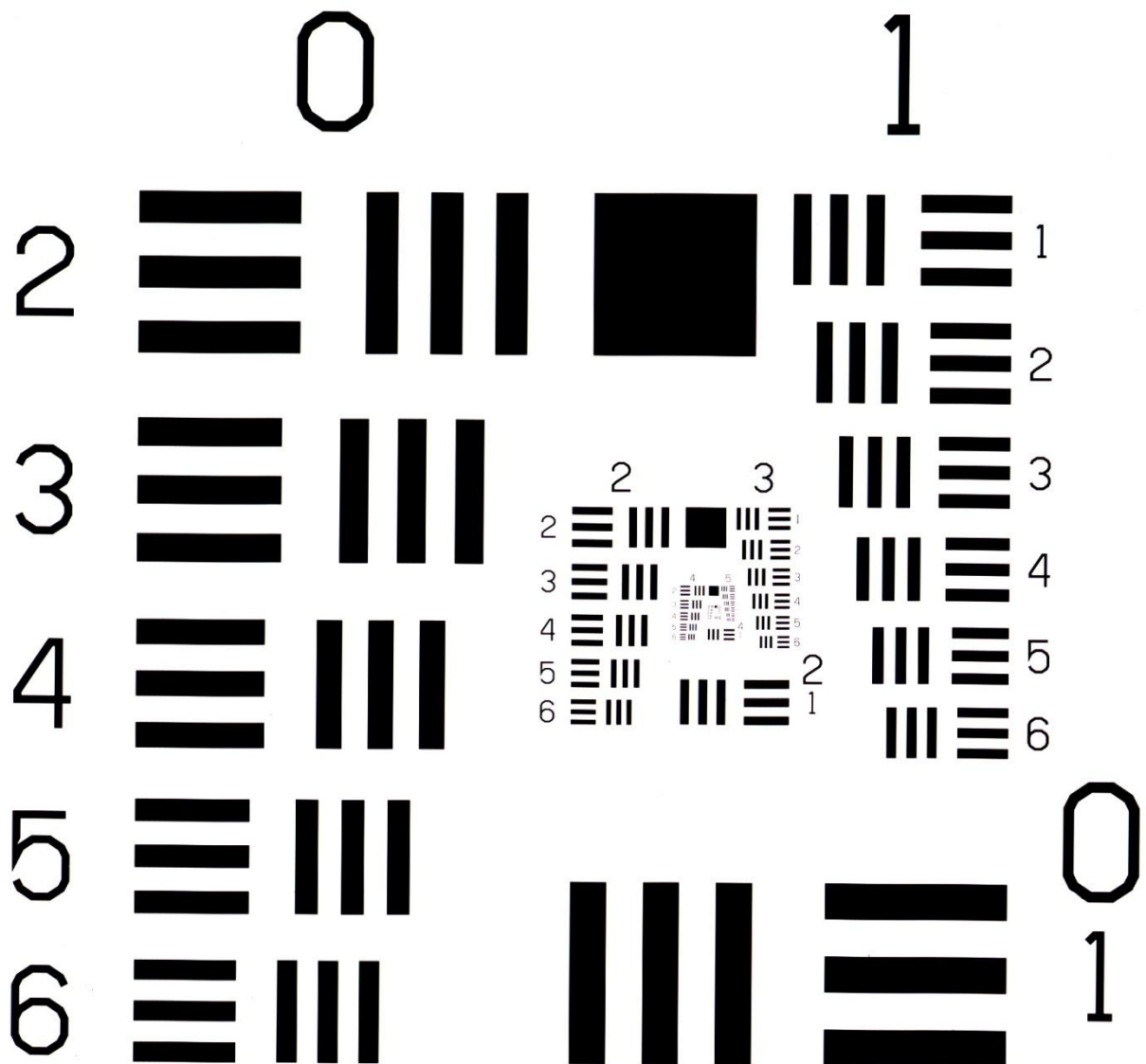


In altri termini, se si traccia una linea bianca su carta bianca, il contrasto è nullo così come la risoluzione: la linea risulta invisibile. L'analisi della risoluzione disgiunta dal contrasto è quindi priva di significato.

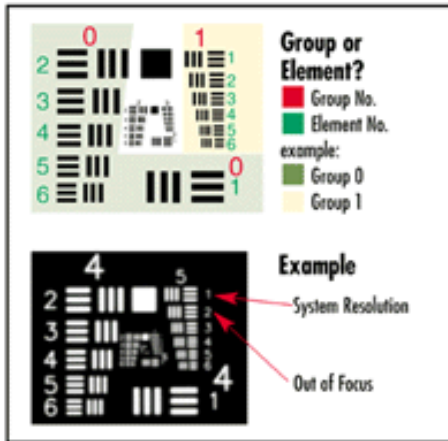
Di norma, si misura la **risoluzione in linee per millimetro o coppie di linee per millimetro, rispettivamente  $l/mm$  e  $lp/mm$**  (dove "lp" sta per "line pair"). È importante non fare confusione tra questi due modi di esprimere la risoluzione, giacché non sono esattamente equivalenti. Se i

tecnicisti fanno riferimento alle linee per millimetro, dando per scontato che una linea nera è necessariamente accoppiata ad una linea bianca, sul piano pratico si preferisce utilizzare le coppie di linee per millimetro. È quindi fondamentale sapere esattamente di cosa si sta discutendo.

Per determinare la risoluzione di un obiettivo, di una pellicola o anche di uno scanner, si utilizza una mira ottica a frequenza spaziale variabile, come la diffusissima USAF 1951:



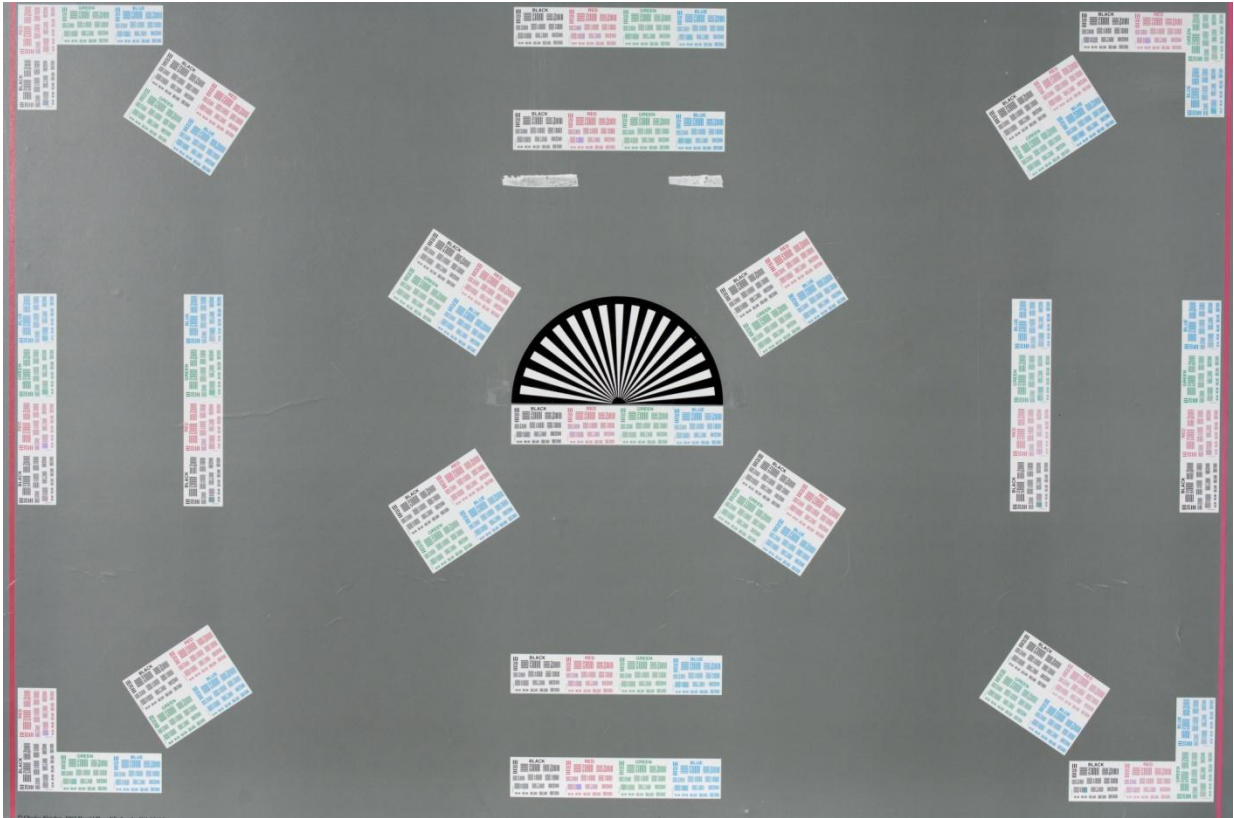
Questa mira ottica contiene in linee organizzate in gruppi ed elementi. Ogni gruppo comprende sei elementi, numerati da 1 a 6, e ciascun elemento consiste in tre linee orizzontali e tre linee verticali, nere su fondo bianco o bianche su fondo nero. Ad ogni elemento all'interno di un gruppo corrisponde una specifica risoluzione, basata sulla larghezza delle linee.



Per condizioni di ripresa standard, dove la distanza a cui collocare la mira dipende dalla lunghezza focale dell'obiettivo, la risoluzione del sistema è determinata dal gruppo e dall'elemento immediatamente precedente quello dove l'alternanza bianco/nero inizia ad essere sostituita da un grigio uniforme. Ad esempio, nella mira a linee bianche su fondo nero, si nota che le linee verticali dell'elemento 2 del gruppo 5 non sono più distinguibili e la risoluzione del sistema è quindi definita dall'elemento 1 dello stesso gruppo, corrispondente a 32 lp/mm (ovvero il sistema è in grado di riprodurre particolari con dimensioni minime fino a 31  $\mu\text{m}$ ):

Risoluzioni mira ottica USAF 1951 [lp/mm]												
Elemento	Numero gruppo											
	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	0.250	0.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00	32.0	64.0	128.0	256.0	512.0
<b>2</b>	0.280	0.561	1.12	2.24	4.49	8.98	17.95	36.0	71.8	144.0	287.0	575.0
<b>3</b>	0.315	0.630	1.26	2.52	5.04	10.10	20.16	40.3	80.6	161.0	323.0	645.0
<b>4</b>	0.353	0.707	1.41	2.83	5.66	11.30	22.62	45.3	90.5	181.0	362.0	
<b>5</b>	0.397	0.793	1.59	3.17	6.35	12.70	25.39	50.8	102.0	203.0	406.0	
<b>6</b>	0.445	0.891	1.78	3.56	7.13	14.30	28.50	57.0	114.0	228.0	456.0	

Per valutare le prestazioni ottiche al centro, a distanze intermedie ed ai bordi dell'immagine generata da un obiettivo, si fissano le mire, anche di colori differenti (RGBK), su un tabellone, disponendole con orientamenti differenti lungo gli assi verticale ed orizzontale e lungo le diagonali:



# CLAIRMONT CAMERA



## HOLLYWOOD

4343 LANKERSHIM BLVD., NORTH HOLLYWOOD, CALIF. 91602  
(818) 761-4440 • FAX (818) 761-0881

## TORONTO

16 OVERLEA BLVD., TORONTO, ON M4H1A4  
(416) 467-1700 • FAX (416) 467-8006

## VANCOUVER

NORTH SHORE STUDIOS, VANCOUVER, B.C. V7J 3S5  
(604) 984-4563 • FAX (604) 984-4693

Values of Targets in Lines per Millimeter at 50% Reduction  
The distance from chart to lens must be 50 focal lengths (or the distance from chart to image plane must be 51 focal lengths)  
Note: Counting the distance includes the values, etc.  
Target: A B C D E F G H I J K  
Lines per mm: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000  
at image.

GRAPHICS COURTESY OF CENTURY PRECISION OPTICS

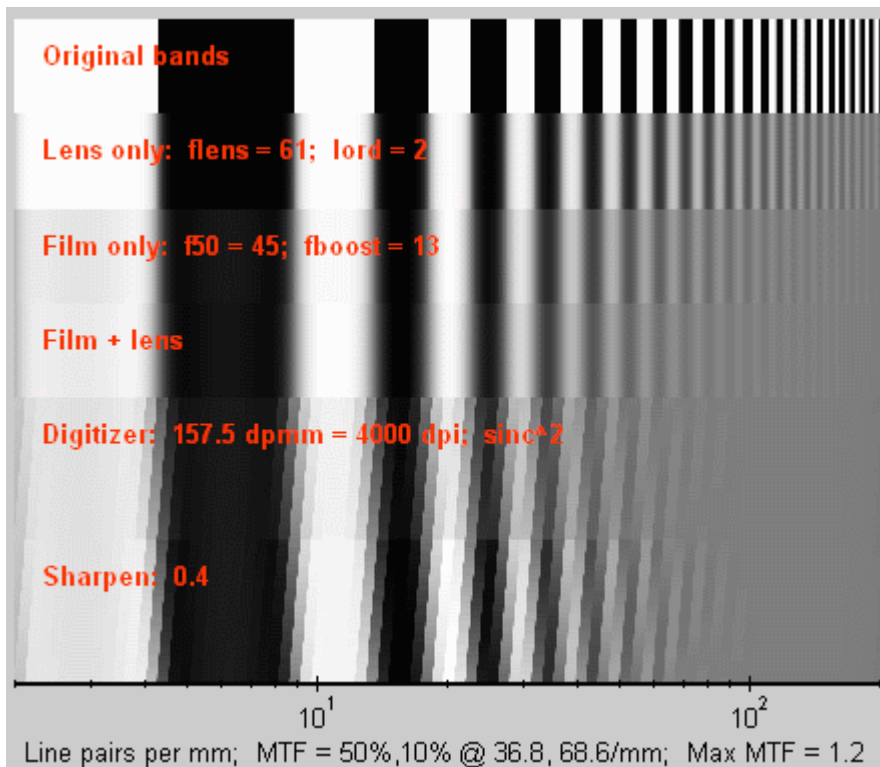
Purtroppo, la risoluzione non è quantificabile in modo assoluto, ma è soggettiva e quindi ciascun individuo ne dà un valore differente rispetto agli altri e lo stesso individuo la giudica in modo diverso in tempi diversi. Ad esempio, per uno specifico test, mentre un osservatore può rilevare una risoluzione di 50 lp/mm, un altro può vedere 45 lp/mm o 55 lp/mm. Una differenza del 10% nel giudizio non è un fatto inusuale e, se si aggiungono altre variabili quali errori di messa a fuoco, può arrivare anche al 30%. E, per rendere ancora più incerto il quadro, l'effettiva qualità dell'immagine fornita dagli obiettivi e dalle pellicole non è strettamente correlata al potere risolvete. Per questo motivo, i soli risultati dei test di risoluzione non sono una misura valida della qualità dell'immagine generata ed i fabbricanti hanno quindi optato per l'utilizzo dei diagrammi MTF.

## Funzione di trasferimento della modulazione

---

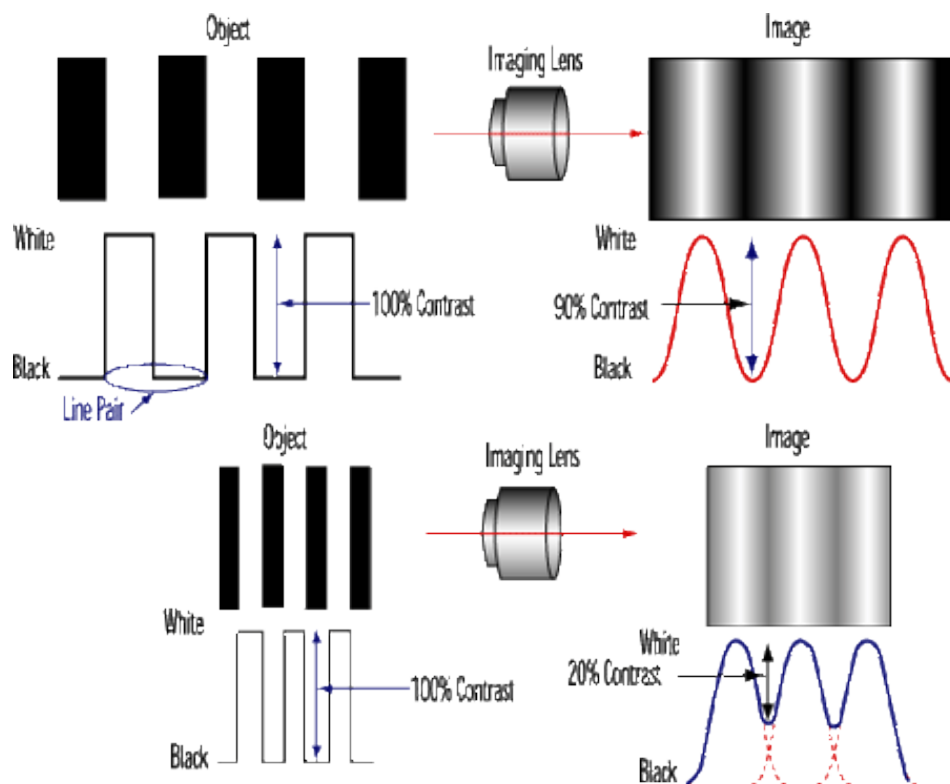
La nitidezza di un sistema fotografico o di un suo singolo componente (obiettivo di ripresa, pellicola, sensore a stato solido, scanner, obiettivo da ingranditore, ecc.) è caratterizzata da un parametro denominato **funzione di trasferimento della modulazione (Modulation Transfer Function, MTF) o risposta in frequenza spaziale (Spatial Frequency Response, SFR)**.

La figura seguente è un tipico esempio:



La parte superiore è la mira ottica composta da linee bianche e nere, con frequenza spaziale crescente da 2 a 200 lp/mm. Le parti sottostanti rappresentano gli effetti cumulativi dell'obiettivo, della pellicola, della combinazione obiettivo+pellicola, dello scanner e dell'algoritmo di elaborazione della nitidezza su computer.

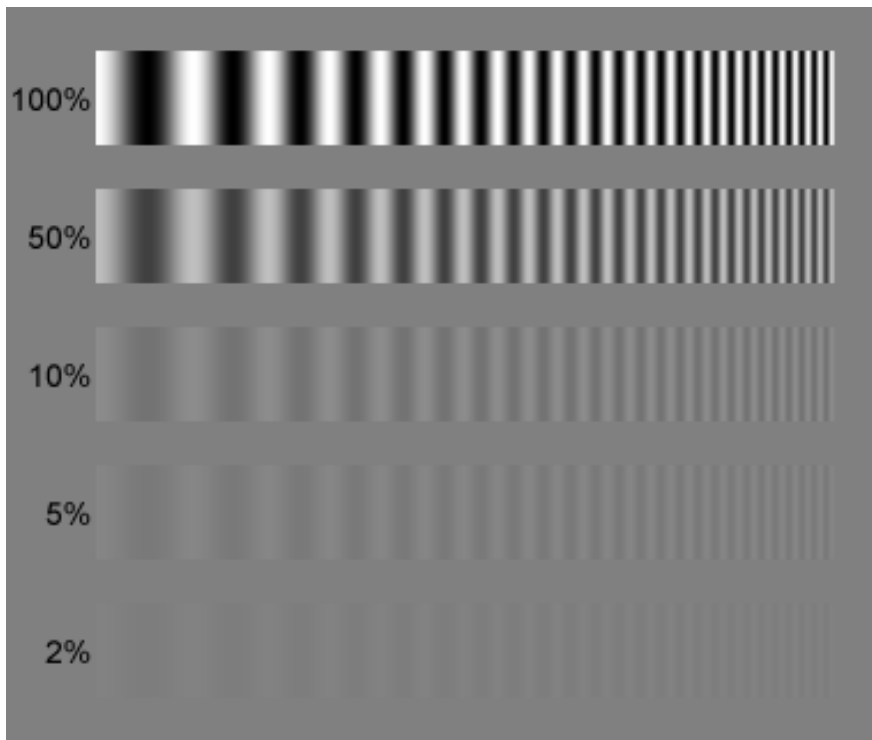
Nessun obiettivo, anche teoricamente perfetto, è in grado di trasferire integralmente il contrasto dell'originale all'immagine generata a causa delle limitazioni derivanti dalla diffrazione. In effetti, riducendo la larghezza delle linee ovvero aumentando la frequenza spaziale della mira ottica, l'obiettivo diventa progressivamente meno efficiente nel trasferire il contrasto:



Più in generale, alle frequenze dove l'MTF di un sistema ottico (pellicola, obiettivo, ecc.) è ipoteticamente del 100%, l'immagine presenta un contrasto pari a quello del soggetto. Alla frequenza dove l'MTF è del 50%, il contrasto è metà del valore originale, e così via. Di solito, l'MTF è normalizzato al 100% alle frequenze più basse, ma può anche superare questo valore limite (con risultanti interessanti).

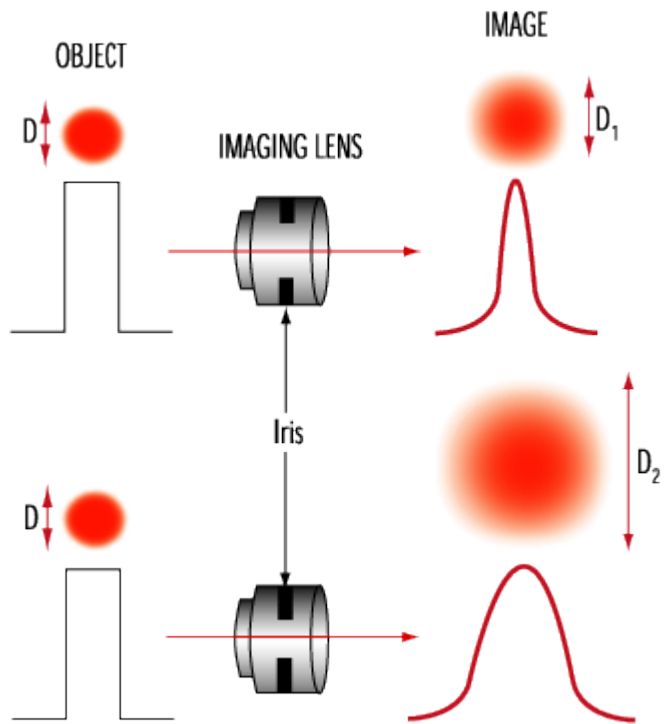
Per una mira ottica a frequenza variabile, i livelli di contrasto dal 100% al 2% sono rappresentati nella figura sottostante:



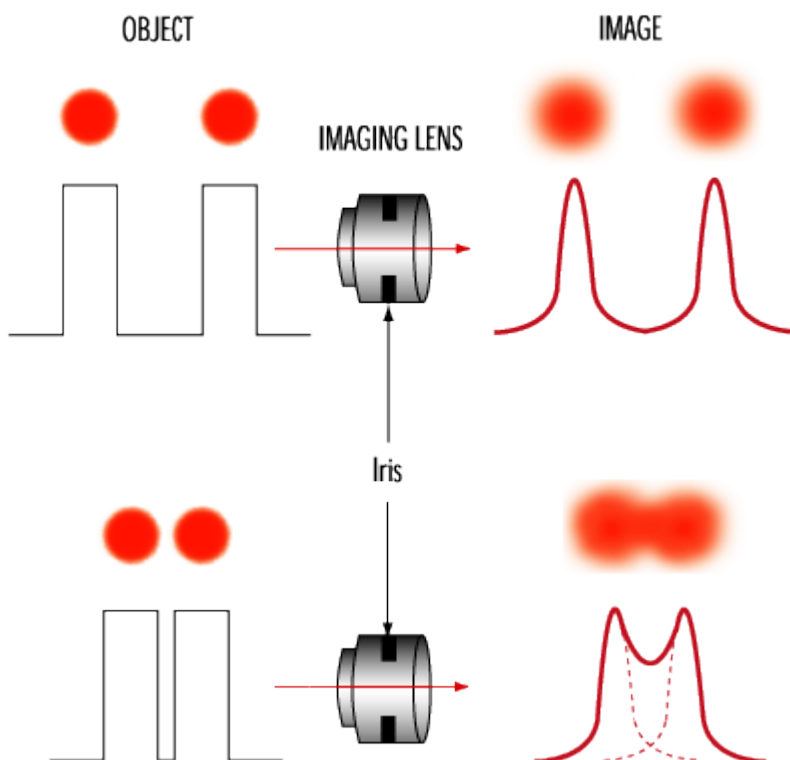


Il contrasto presenta un'attenuazione moderata per  $MTF = 50\%$  e accentuate per  $MTF = 10\%$ . L'immagine al  $2\%$  risulta visibile solo grazie alle favorevoli condizioni di osservazione: è circondata da grigio neutro, non presenta disturbi (è priva di grana) ed il contrasto di visualizzazione dei monitor CRT e LCD è relativamente alto. In condizioni meno propizie, la sua visibilità sarebbe precaria o nulla.

Per la maggior parte degli obiettivi, la qualità dell'immagine alla massima apertura non è limitata dalla diffrazione, bensì dalle aberrazioni ottiche residue e dalle tolleranze di lavorazione. La chiusura del diaframma permette solitamente di ridurre gli effetti negativi delle aberrazioni e di migliorare le prestazioni ottiche. La chiusura del diaframma si rende sovente necessaria per incrementare la profondità di campo e di fuoco. Ma se si supera il valore critico (generalmente  $f/8$  per il formato 35 mm), l'obiettivo incomincia ad essere limitato dalla diffrazione, con conseguente riduzione della risoluzione dell'immagine.



Si supponga di dover riprendere con un obiettivo due punti in avvicinamento tra loro. Al diminuire della distanza tra i centri, le loro immagini iniziano a fondersi.

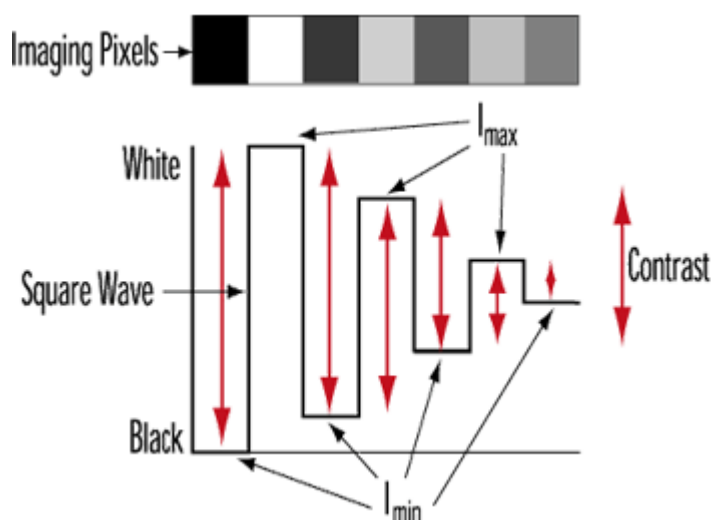


Dove gli schemi di diffrazione dei due punti si combinano, si genera un'area rosa che rende meno agevole distinguere visivamente i dischi centrali rossi. Al diminuire della distanza, questa zona di separazione rosa diventa sempre più scura e più difficile da individuare, contribuendo a fondere progressivamente in un'unica entità i due punti. La risoluzione dipende dalla capacità dell'obiettivo di evidenziare questo spazio tra i punti. In altri termini, per determinare se si sta osservando due punti piccoli o un singolo punto più grande, il sistema ottico deve essere in grado di rilevare una differenza di contrasto tra i punti e lo spazio intermedio. Pertanto, la risoluzione del sistema ottico dipende dalla sfocatura causata dalla diffrazione e dalle aberrazioni, dalla frequenza spaziale e dalla capacità di rilevare i contrasti.

Poiché il contrasto e la risoluzione sono così strettamente connessi, diventa vantaggioso specificare il livello di contrasto per una data risoluzione mediante la curva della funzione di trasferimento della modulazione. La percentuale di contrasto è data dalla seguente formula:

$$\text{contrasto } \% = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \cdot 100$$

dove:  $I_{max}$  = intensità (luminanza) massima,  
 $I_{min}$  = intensità (luminanza) minima.



La tradizionale misurazione della risoluzione in lp/mm corrisponde all'incirca a frequenze spaziali dove l'MTF è compreso tra il 5% ed il 2% (in valori frazionari, tra lo 0,05 e lo 0,02); il valore varia comunque con

l'osservatore. Il valore del 9% corrisponde alla definizione del limite di diffrazione di Rayleigh:

$$d = \frac{0,61\lambda}{NA} = 1,22\lambda \cdot N$$

dove:  $d$  = distanza minima risolvibile,  
 $\lambda$  = lunghezza d'onda,  
 $NA$  = apertura numerica,  
 $N$  = apertura relativa.

**La nitidezza percepita dell'immagine (diversa dalla tradizionale risoluzione in lp/mm) è strettamente legata alla frequenza spaziale corrispondente al 50% (0,5) della funzione di trasferimento della modulazione, cioè al dimezzamento del contrasto.**

In base al limite di diffrazione di Rayleigh, la dimensione minima risolvibile dei particolari della scena ripresa è pari al doppio della suddetta distanza minima:

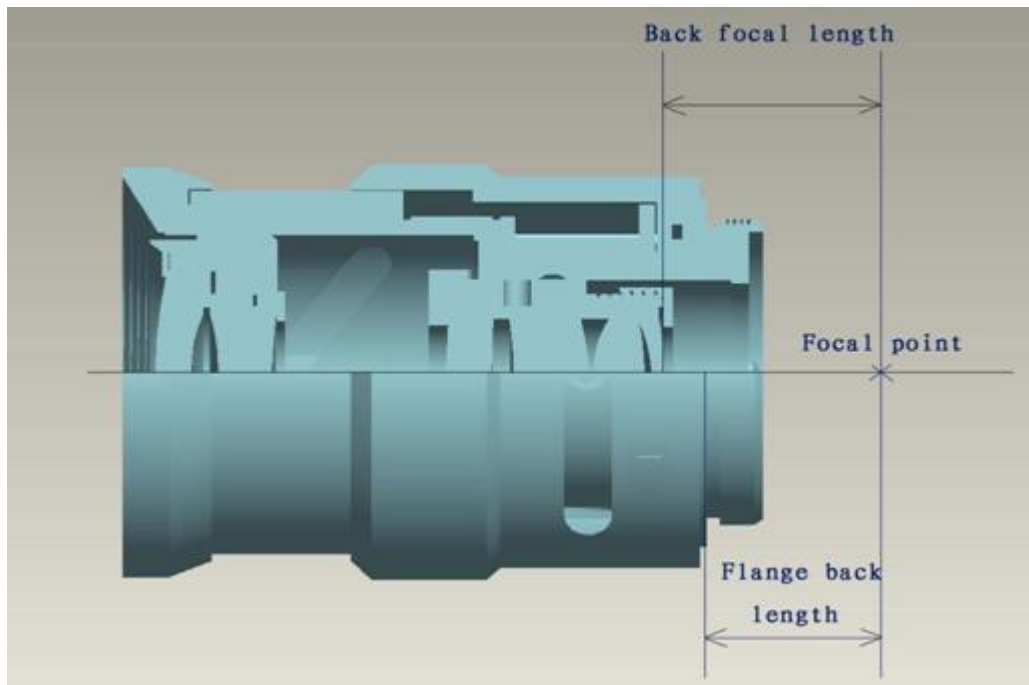
$$\phi = 2,44\lambda \cdot N$$

dove:  $\phi$  = dimensione minima risolvibile,  
 $\lambda$  = lunghezza d'onda,  
 $N$  = apertura relativa.

Il grafico seguente illustra la risposta combinata dello zoom Canon EF 28-70mm f/2.8L e della pellicola Fujichrome Velvia utilizzando mire ottiche a frequenza spaziale variabile sia sinusoidale sia a barre. La curva rossa è la risposta in variazione di densità della combinazione con mira ottica a barre, mentre la curva blu è la risposta in frequenza spaziale espressa in percentuale ( $10^2 = 100\%$ ). La curva sottile tratteggiata blu è l'MTF del solo obiettivo.



- controllo computerizzato e visualizzazione a monitor dei risultati dell'analisi,
- misurazioni MTF a tre differenti frequenze spaziali contemporaneamente,
- MTF in funzione della distanza dal centro dell'immagine e della **lunghezza focale posteriore (back focal length)**,



- commutazione rapida tra linee sagittali e tangenziali,
- misurazione in tempo reale per la messa a punto dell'ottica durante il montaggio,
- commutazione rapida tra le differenti bande spettrali utilizzate per l'analisi,
- misurazione della curvatura di campo e dell'aberrazione cromatica assiale,
- misurazione della **distanza di flangia posteriore (flange-back distance)**,
- commutazione rapida tra misurazioni assiali ed extrassiali,
- rotazione dell'obiettivo lungo l'asse ottico, con registrazione automatica dell'MTF minima e massima,
- ingombri contenuti della stazione di lavoro.



## Diagramma MTF di obiettivi fotografici

---

Un obiettivo ideale trasmetterebbe completamente il 100% della luce incidente. Ma, poiché nessuna ottica è perfetta, vi sono delle perdite, misurabili in termini di **modulazione (o variazione) del contrasto**. Questa modulazione del contrasto viene determinata a differenti frequenze spaziali, cioè con un'alternanza di righe bianche e nere della mira ottica del test compresa tra 0 e 100 lp/mm.

Nel diagramma MTF, l'asse verticale riporta valori frazionari compresi tra 0 e 1, cioè valori percentuali compresi tra 0% e 100%. Ad esempio, 0,10 e 0,75 significano rispettivamente il 10% ed il 75% di contrasto.

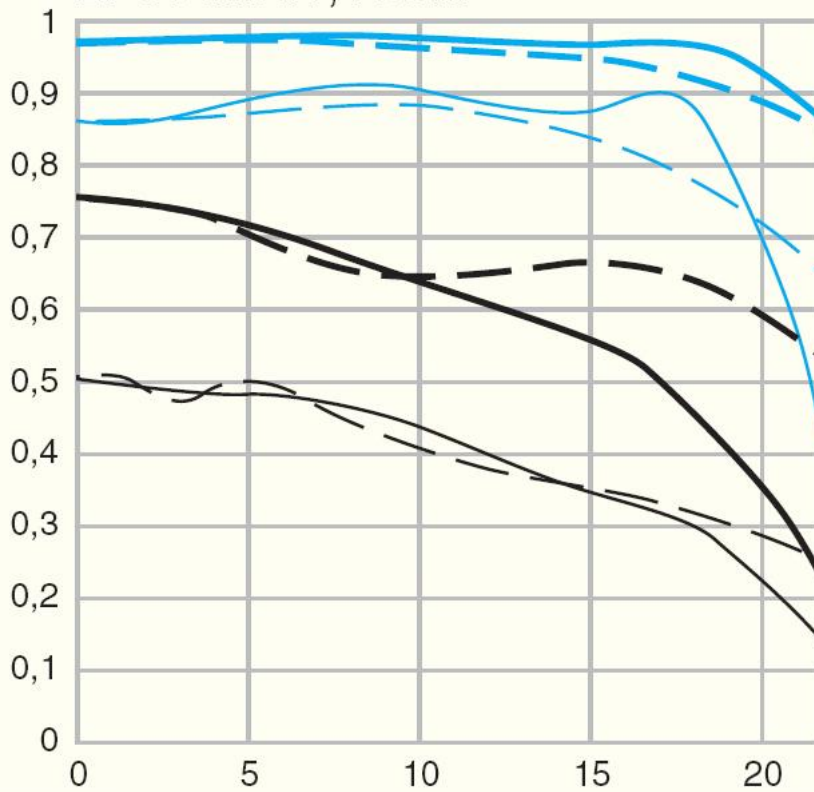
L'asse orizzontale riporta la distanza, espressa in millimetri, dal centro verso i bordi dell'immagine. Ad esempio, 0 indica l'intersezione dell'asse ottico con il piano dell'immagine e 20 la circonferenza centrata sull'intersezione ed avente un raggio pari a 20 mm (nel caso del formato 24x36 mm, il fotogramma risulterebbe quasi completamente all'interno di questa circonferenza, avendo una diagonale di circa 43 mm e quindi di poco superiore al diametro di 40 mm).

Si consideri l'obiettivo Canon EF 50mm f/1.4 USM per il formato 24x36 mm ed il relativo diagramma MTF:





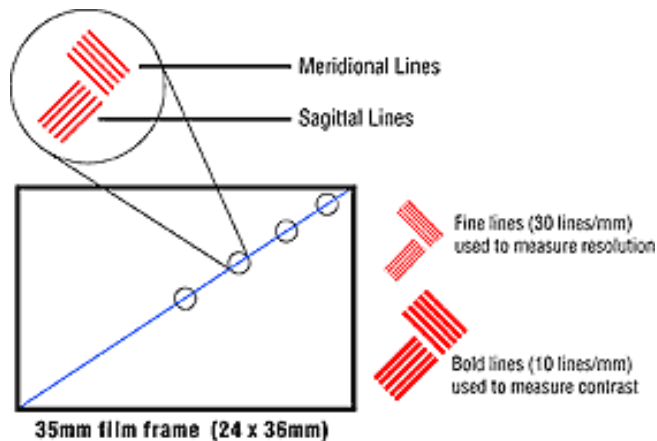
## EF 50 mm f/1,4 USM



Frequenza spaziale	Apertura massima		f/8	
	S	M	S	M
10 righe/mm				
30 righe/mm				

Nel diagramma, sono presenti 8 curve, ognuna con uno specifico significato:

- **curve spesse**, relative a misurazioni a **10 lp/mm (bassa frequenza spaziale, cioè bassa risoluzione)**,
- **curve sottili**, relative a misurazioni a **30 lp/mm (alta frequenza spaziale, cioè alta risoluzione)**,
- **curve nere**, relative a misurazioni a **diaframma tutto aperto**,
- **curve blu**, relative a misurazioni a **diaframma chiuso a f/8**,
- **curve continue**, relative a misurazioni in **senso tangenziale**,
- **curve tratteggiate**, relative a misurazioni in **senso sagittale**.



Infatti, Canon utilizza una mira ottica costituita da gruppi ripetuti di linee parallele alle diagonali del formato e suddivisi in due diversi livelli di frequenza spaziale: si tratta delle cosiddette **linee sagittali "S"**. Orientati a 90° rispetto ai primi, sono presenti anche gruppi ripetuti di linee perpendicolari alle diagonali del formato, sempre suddivisi in due diversi livelli di frequenza spaziale: si tratta delle cosiddette **linee tangenziali "M"** (dall'inglese "Meridional").

Osservando il grafico, occorre tenere presente che più una curva è alta e maggiore è il relativo contrasto, mentre uno spostamento verso destra significa analizzare zone dell'immagine mano a mano più distanti dal centro.

I punti fondamentali per l'analisi del grafico (e di altri analoghi) sono i seguenti:

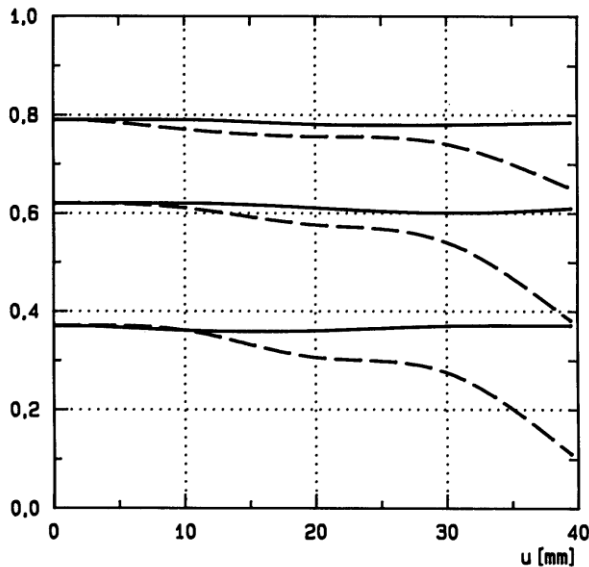
- più alta è la curva a 10 lp/mm (curve spesse), maggiore è l'efficienza di riproduzione del contrasto da parte dell'obiettivo,
- più alta è la curva a 30 lp/mm (curve sottili), maggiore è il potere risolvibile e quindi la nitidezza assicurata dall'obiettivo,
- quanto più le curve nere, generate a diaframma tutto aperto, sono vicine a quelle blu, generate a diaframma chiuso a  $f/8$ , migliori sono le prestazioni dell'obiettivo a tutta apertura,
- in generale, la qualità dell'immagine fornita dall'obiettivo è da ritenersi eccellente quando le curve spesse (10 lp/mm) si mantengono sopra 0,8, soddisfacente quando si mantengono sopra 0,6, insufficiente quando rimangono sotto 0,6.

Come ulteriore esempio, si consideri ora un obiettivo per il formato 6x6 cm, ovvero il Carl Zeiss Sonnar T\* 5.6/250 CFI per Hasselblad 500, ed il relativo diagramma MTF:

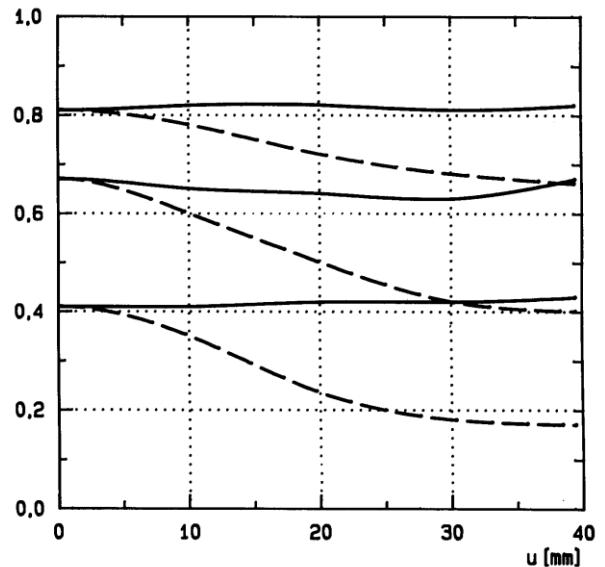


Modulation transfer  $T$  as a function of image height  $u$ . Slit orientation: tangential — — — sagittal ————  
 White light. Spatial frequencies  $R = 10, 20$  and  $40$  cycles/mm

$T$  f-number  $k = 5.6$



$T$  f-number  $k = 8$



Anche in questo caso, il grafico riporta coppie di curve per mire ottiche con linee sagittali e tangenziali, ma riferite a tre differenti frequenze spaziali, 10, 20 e 40 lp/mm, e due aperture intermedie del diaframma,  $f/5.6$  e  $f/8$ , per un totale di 12 curve.

In base a questi due esempi, è evidente che ciascun produttore di ottiche adotta parametri non necessariamente analoghi a quelli della concorrenza per la realizzazione dei diagrammi MTF. Di conseguenza, per una corretta interpretazione dei diagrammi e quindi delle prestazioni ottiche, è assolutamente indispensabile conoscere i suddetti parametri di analisi dell'obiettivo.

Le curve MTF permettono anche di determinare le caratteristiche ottiche del **bokeh**, un termine fotografico di origine giapponese che indica il **contributo dello sfuocato o resa dello sfuocato** e fa riferimento alla tecnica di composizione creativa basata sulla capacità di un obiettivo di mettere a fuoco solo una limitata porzione dei piani di cui è composta l'immagine fotografica. Mentre alcune ottiche generano sfocature eccessivamente nette, altre forniscono sfocature più morbide e progressive. Il risultato dipende dalla resa ottica dell'obiettivo nel riprodurre le linee tangenziali e sagittali: più le curve continue e quelle tratteggiate sono vicine e più piacevole è il bokeh.



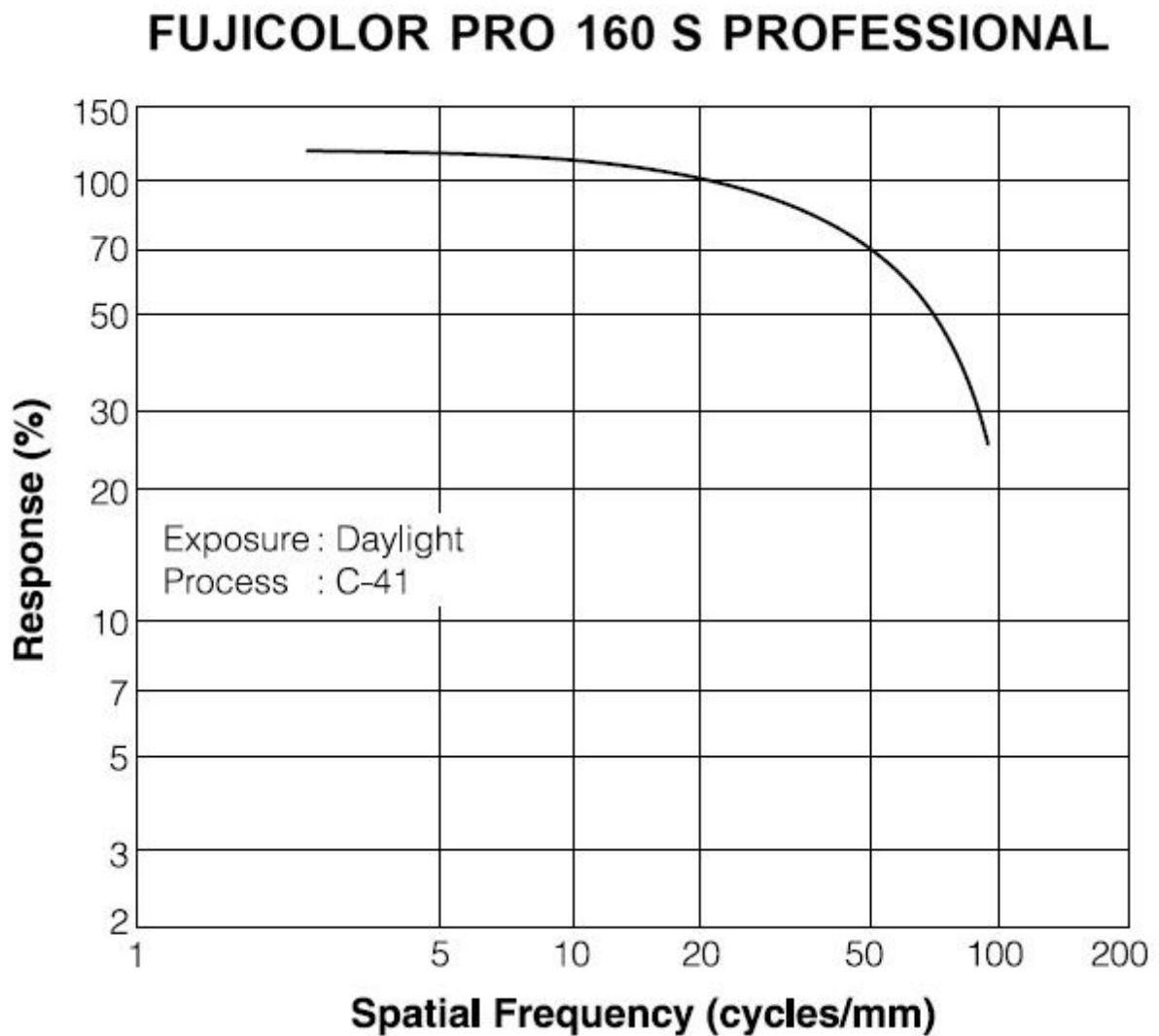
Incidentalmente, le linee tangenziali e sagittali consentono anche di valutare l'astigmatismo e la curvatura di campo dell'ottica. Infine, occorre sottolineare che il diagramma MTF non è in grado di offrire un quadro esauriente delle caratteristiche ottiche dell'obiettivo. Ad esempio, non permette di valutare variabili fondamentali quali la vignettatura, la distorsione e la resistenza opposta al flare.

## Diagramma MTF di pellicole fotografiche

---

L'MTF delle pellicole fotografiche è relativamente semplice: è uguale in tutte le direzioni ed uniforme su tutta la superficie del fotogramma. È importante sottolineare che l'MTF non è un indice della grana dell'immagine: la grana aumenta con la rapidità dell'emulsione fotografica, mentre l'MTF ne risente solo marginalmente.

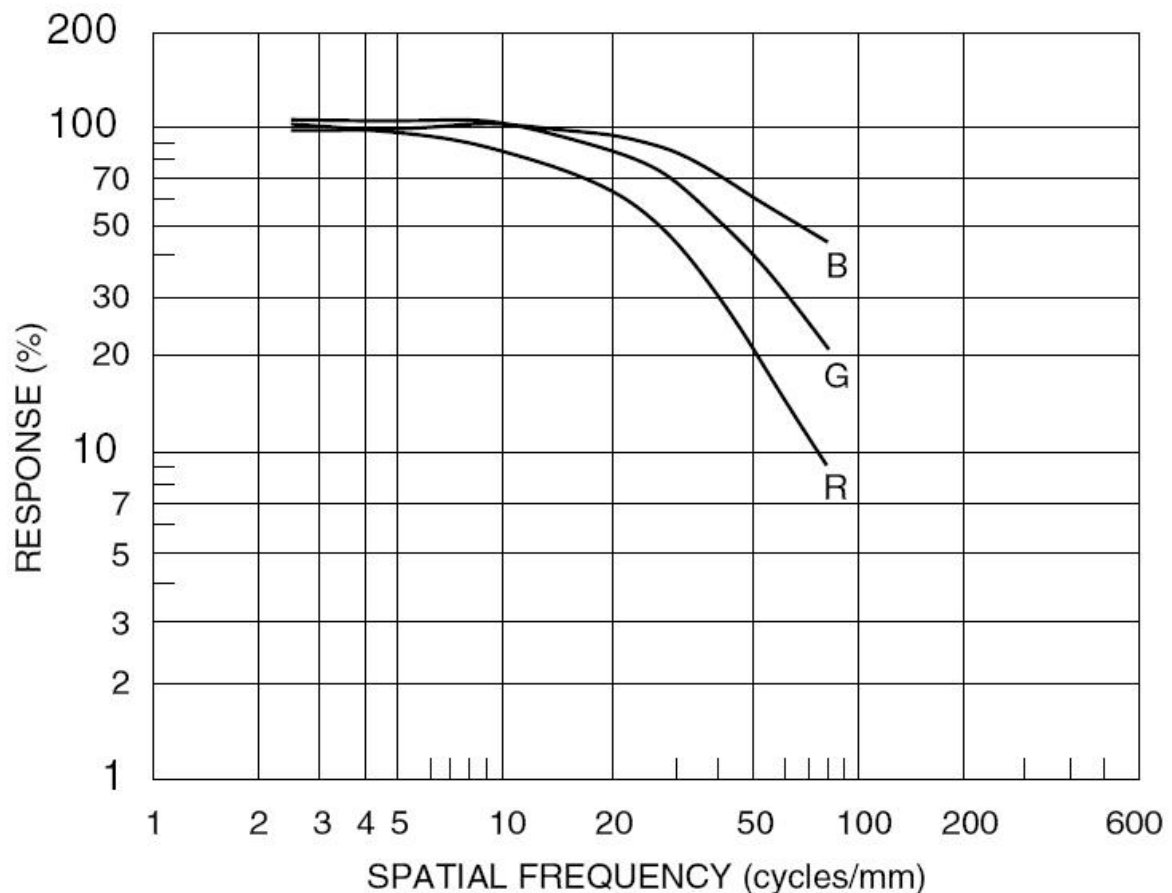
La curva MTF seguente è relativa alla pellicola fotografica negativa a colori Fujicolor Pro 160S:



Sarebbe un tipico diagramma MTF se non fosse per un particolare che non trova alcuna giustificazione tecnica: la risposta è superiore al 100% alle basse frequenze spaziali (forse un banale errore grafico?). L'MTF raggiunge il 50% a circa 65 lp/mm ed è limitata a 100 lp/mm.

Il diagramma MTF sottostante è invece relativo alla pellicola fotografica diapositiva a colori Kodak E100VS:

# KODAK PROFESSIONAL EKTACHROME Film E100VS



Come si può notare, Kodak segue un approccio diverso, riportando le curve MTF di ciascuno degli strati RGB. La curva dello strato sensibile al verde è la più importante, in quanto il massimo di sensibilità dell'occhio umano cade in questa banda spettrale. Per questa curva, l'MTF raggiunge il 50% a circa 40 lp/mm ed è limitata a 100 lp/mm.

Dal confronto dei diagrammi MTF delle due pellicole, risulta subito evidente che la pellicola negativa presenta una maggiore nitidezza. L'MTF raggiunge il 50% a circa 65 lp/mm ed è limitato a 100 lp/mm. Il motivo è dovuto probabilmente al fatto che la pellicola diapositiva è destinata alla visione diretta: per ottenere toni scuri profondi e dettagliati ed una  $D_{max}$  più alta di quella della pellicola negativa, è necessario aumentare lo spessore degli strati fotosensibili al fine di contenere una quantità più alta di coloranti. L'elevato gradimento che accompagna le diapositive è dovuto essenzialmente alla grana più fine ed all'assenza di perdite di nitidezza che accompagna invece la stampa dei negativi.

## Acuità visiva umana

---

La capacità del sistema visivo umano di risolvere i dettagli è nota come **acuità visiva**. L'occhio umano normale è in grado di distinguere sequenze di linee bianche e nere con una risoluzione angolare di circa 1 minuto d'arco:

$$\text{risoluzione angolare} = 1/60^\circ = \pi/(60 \cdot 180) = 0,000291 \text{ rad}$$

Alcuni individui sono però in grado di raggiungere una risoluzione angolare pari alla metà di questo valore.

Alla distanza  $d$  dall'occhio (che ha una lunghezza focale nominale di 16,5 mm), questa risoluzione angolare corrisponde ad una dimensione dell'oggetto pari a:

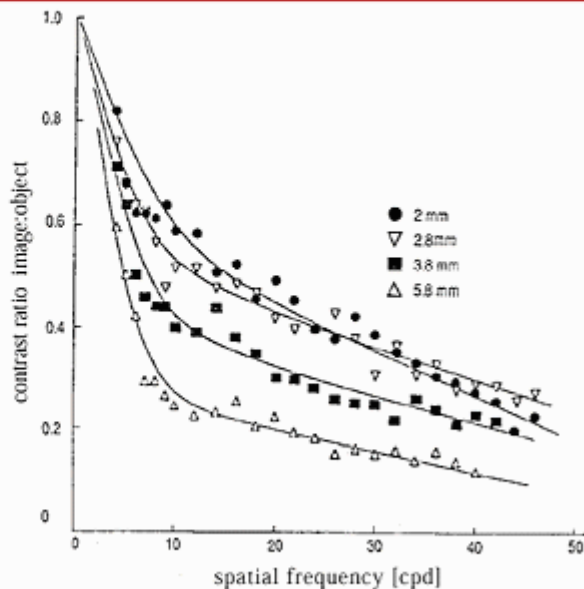
$$L = (\text{angolo in radianti}) \cdot d = 0,000291 \cdot d$$

Ad esempio, se si osserva un oggetto posto a 25 cm (250 mm), la tipica distanza a cui si esamina una stampa fotografica 20x25 cm,  $L$  assume il valore di 0,0727 mm. Poiché una coppia di linee corrisponde a due linee di queste dimensioni, la relativa frequenza spaziale è di 6,88 lp/mm. Nel caso di un fotogramma 35 mm ingrandito 8x, la frequenza spaziale sulla pellicola dovrà essere pari a  $8 \cdot 6,88 = 55 \text{ lp/mm}$ . Questo significa che l'eventuale superamento della soglia di 55 lp/mm dell'MTF di una fotocamera 35 mm (obiettivo+pellicola, ecc.) non comporta nessun beneficio per una stampa 20x25 cm, mentre ne avrebbe per ingrandimenti più alti.

Il grafico seguente è il diagramma MTF dell'occhio umano:

## Optical modulation transfer function (MTF) of the human eye

- MTF is measured directly with sinewave gratings.
- The optical modulation transfer function (MTF) can be interpreted as Fourier transform of the optical LSF.



Bernd Girod: EE368b Image and Video Compression

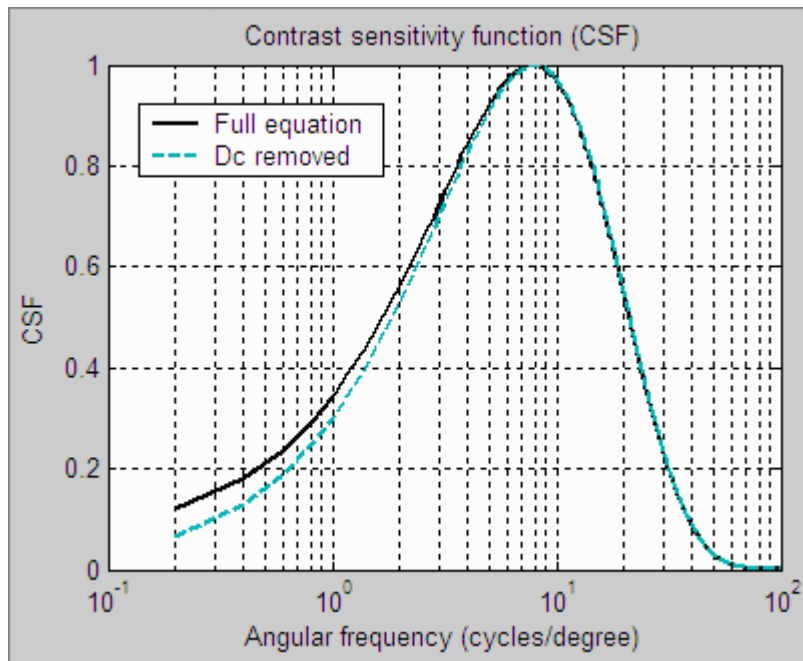
Human Visual Perception no. 5

L'asse orizzontale riporta la **frequenza angolare in cicli/grado (cycle per degree, cpd)**. Le curve MTF sono relative a diametri della pupilla compresi tra 2 mm (luminosità intensa, f/8) e 5,8 mm (luminosità debole, f/2.8). A 30 cpd, corrispondenti a particolari di 1 minuto d'arco, l'MTF passa da 0,4 per la pupilla di 2 mm a 0,16 per quella di 5,8 mm.

L'MTF del sistema visivo umano, che è limitato alle alte frequenze angolari dalla geometria ottica dell'occhio e dalla densità dei coni nella retina, da sola non fornisce tutte le risposte. Le interazioni neurali, quali l'inibizione laterale, limitano la risposta dell'occhio alle basse frequenze angolari, ovvero l'occhio non percepisce le variazioni più graduali della densità.

La risposta complessiva dell'occhio è denominata **funzione di sensibilità al contrasto (Contrast Sensitivity Function, CSF)**. Vari studi collocano il picco della CSF per alti livelli di luminosità (tipica condizione di osservazione delle stampe) tra 6 e 8 cicli/grado; nel grafico sottostante, l'ascissa del picco è di poco inferiore a 8 cicli/grado.





## Stabilizzazione dell'immagine

---

Nella pratica fotografica, sia analogica sia digitale, il **tremolio involontario** generato dalle mani e/o dalla respirazione del fotografo, in particolare utilizzando a mano libera obiettivi pesanti ed ingombranti e tempi di otturazione abbastanza lunghi, determina una perdita di nitidezza delle immagini (**effetto mosso**). In medicina, il fenomeno delle contrazioni muscolari ritmiche involontarie negli individui sani è noto come **tremore fisiologico**.

Soprattutto nell'ultimo decennio, i principali produttori di fotocamere, telecamere ed obiettivi hanno messo a punto vari sistemi di stabilizzazione per compensare il tremolio involontario.

Benché i primi studi al riguardo risalgano a prima che Garrett W. Brown brevettasse nel 1976 il sistema Steadicam per l'industria cinematografica, il metodo classico per assicurare la massima nitidezza alle immagini è stato ed è l'impiego di treppiedi e monopiedi.



Lo sviluppo degli stabilizzatori integrati data dagli anni '80 del XX secolo e Canon è stato il primo produttore a commercializzare nel 1995 zoom intercambiabili per fotocamere SLR, formato 35 mm, dotati di sistema di stabilizzazione dell'immagine.

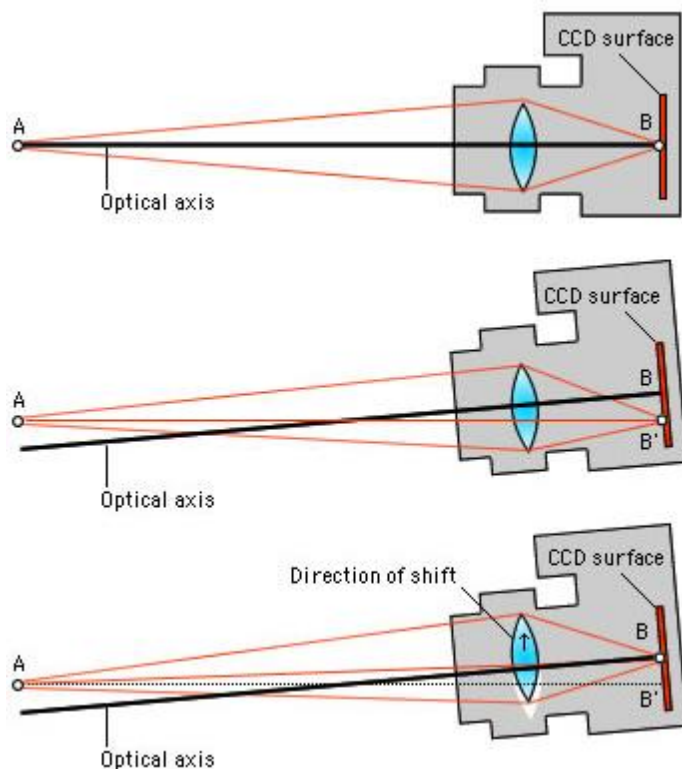
Grazie all'ingresso massiccio dell'elettronica integrata e dei fotosensori a stato solido nel settore video-fotografico, sul mercato sono ormai disponibili diverse ed affidabili soluzioni tecnologiche di stabilizzazione. Infatti, la rilevazione del tremolio involontario mediante sensori integrati nella fotocamera o nell'obiettivo, gli attuatori ad elevata velocità di risposta e l'elaborazione digitale del segnale rappresentano attualmente lo stato

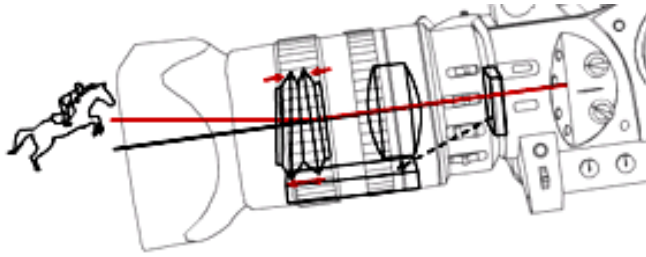
dell'arte. Benchè questi sistemi sono più o meno efficaci nel contrastare le oscillazioni della fotocamera, non sono ovviamente in grado di distinguere e ridurre l'effetto mosso derivante dai movimenti del soggetto ripreso. Inoltre, poiché la rilevazione è affidata a sensori interni all'obiettivo o al corpo della fotocamera, il panning potrebbe essere erroneamente interpretato come un effetto indotto dal tremolio involontario.

## Stabilizzazione ottica

---

Questo tipo di stabilizzazione è implementabile sia nelle fotocamere sia nelle videocamere e telecamere. Per compensare il tremolio involontario, la **stabilizzazione ottica o stabilizzazione optoelettronica** interviene sul percorso dei raggi luminosi: un gruppo ottico mobile o un prisma a geometria variabile alterano il percorso ottico al fine di evitare l'effetto mosso. Questo risultato viene ottenuto traslando l'elemento correttivo perpendicolarmente all'asse ottico o modificando l'angolo di apertura del prisma.



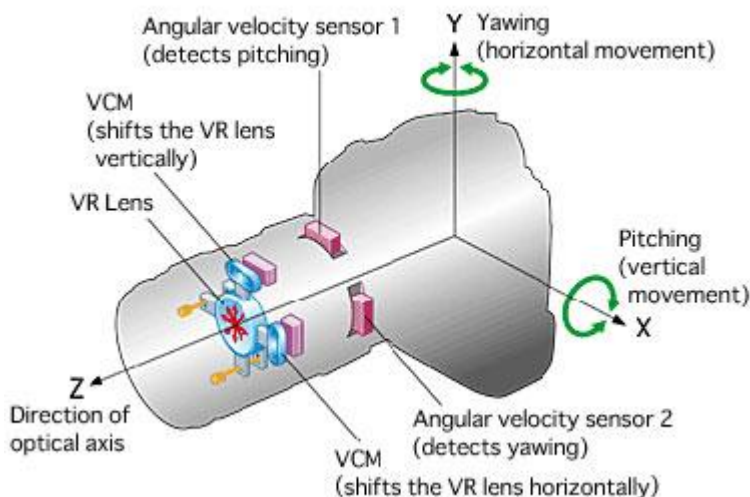


A titolo indicativo, l'effetto mosso indotto dalle oscillazioni di una fotocamera per il formato 35 mm si manifesta generalmente con tempi di otturazione superiori all'inverso della lunghezza focale ( $1/f$ ) espressa in millimetri. La stabilizzazione ottica consente al fotografo di utilizzare la fotocamera a mano libera con tempi più lunghi di 2-4 stop rispetto a tale valore limite.

Il principio di funzionamento della stabilizzazione ottica è molto simile a quello della **stabilizzazione elettromeccanica (Electromechanical Stabilization, EMIS)**. La principale differenza sta nell'elemento correttivo: mentre il sistema OIS utilizza un gruppo di lenti o un prisma, il sistema EMIS interviene sul fotosensore a stato solido (CCD/CMOS).

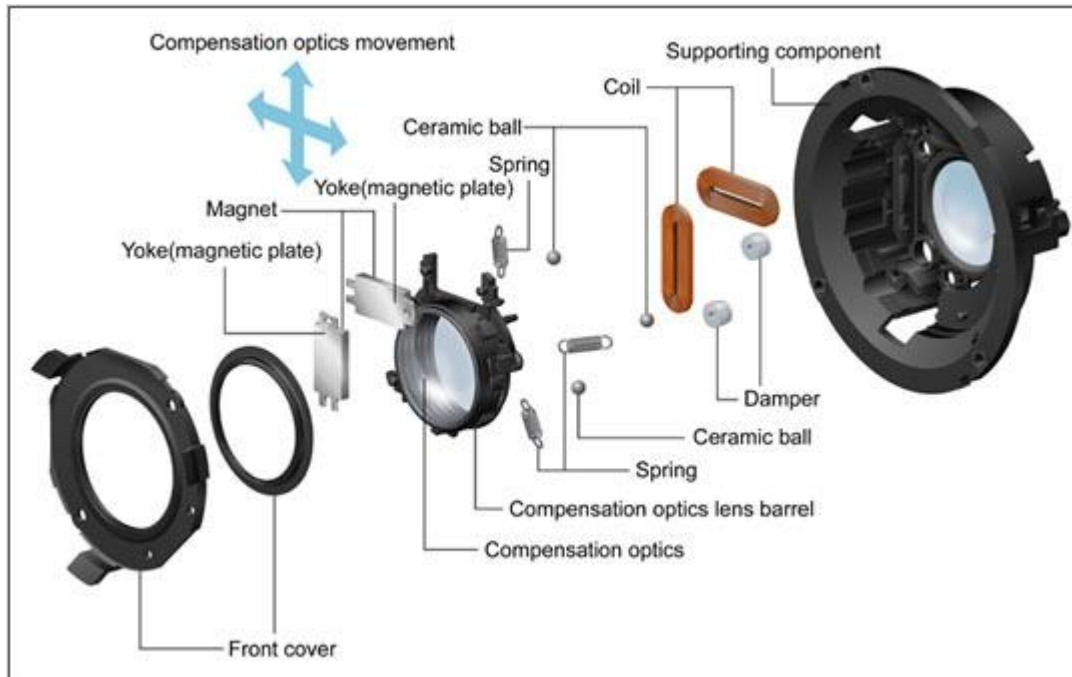
### Gruppo ottico mobile

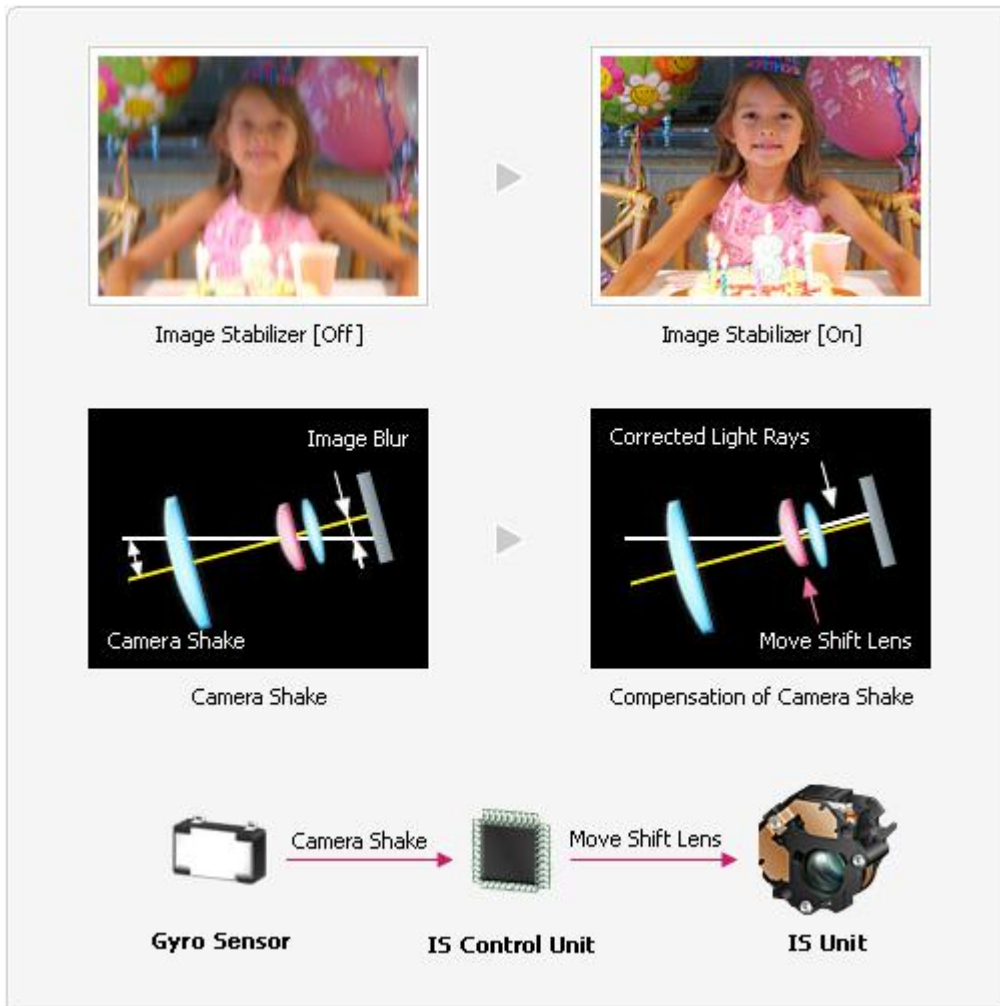
Inserito nell'obiettivo, lo **stabilizzatore d'immagine ottico (Optical Image Stabilizer, OIS)** rileva le oscillazioni della fotocamera o videocamera mediante due sensori di velocità angolare, uno per l'**asse di beccheggio (pitch axis)** e l'altro per l'**asse di imbardata (yaw axis)**.



L'unità di controllo riceve sia la direzione e l'entità della correzione calcolate da un microprocessore sia i dati sulla posizione del gruppo ottico mobile

rilevati mediante sensori. Successivamente, determina i parametri di intervento per l'attuatore del gruppo ottico mobile.





Ogni fabbricante denomina la tecnologia OIS in modo differente dagli altri.



***Image Stabilization (IS):***

Il sistema messo a punto da Canon prevede due modalità di intervento dello stabilizzatore, uno per la normale stabilizzazione delle immagini e l'altro per l'utilizzo del panning. Con un monopiede, lo stabilizzatore opera analogamente all'impiego della fotocamera a mano libera. Inoltre, i teleobiettivi con focale pari o superiore a 300 mm dispongono di un meccanismo che consente il corretto funzionamento dello stabilizzatore quando sono montati su treppiede.



**Nikon**

***Vibration Reduction (VR):***

Nella maggior parte degli obiettivi VR lo stabilizzatore viene attivato premendo leggermente il pulsante di scatto. Quando il fotografo studia l'inquadratura tenendo premuto a metà corsa il pulsante di scatto, il sistema determina istantaneamente se il movimento della fotocamera è intenzionale o se causato da tremolio involontario. Mentre interviene nel secondo caso, non effettua invece alcuna compensazione nel primo per non interferire con l'operato del fotografo.

Gli algoritmi di intervento attivati in fase di composizione dell'inquadratura e quelli attivati al momento dell'esposizione sono differenti. Infatti, premendo a metà corsa il pulsante di scatto, l'algoritmo iniziale assicura un'immagine nel mirino di qualità soddisfacente; durante l'esposizione, viene attivato un altro algoritmo specifico per compensare ogni minima oscillazione. Inoltre, al momento dello scatto, lo stabilizzatore si riporta in posizione neutra (centrata sull'asse ottico) qualunque sia stata quella immediatamente precedente. Poiché l'ampiezza della traslazione dello stabilizzatore è limitata, il ritorno in posizione neutra massimizza gli effetti della riduzione delle oscillazioni nonché le prestazioni ottiche.



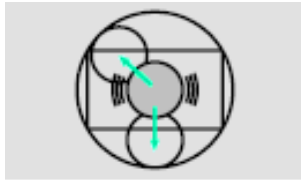
**Panasonic  
& Leica**

***Mega Optical Image Stabilizer (MegaOIS):***

Il sistema messo a punto da Panasonic e Leica prevede due modalità di intervento dello stabilizzatore:

- ***Compensazione continua***  
Lo stabilizzatore è sempre attivo e permette al fotografo di osservare più facilmente le condizioni di messa a fuoco dell'immagine nell'LCD della fotocamera.

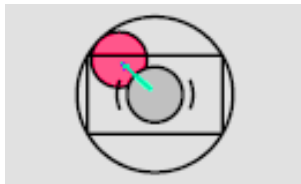




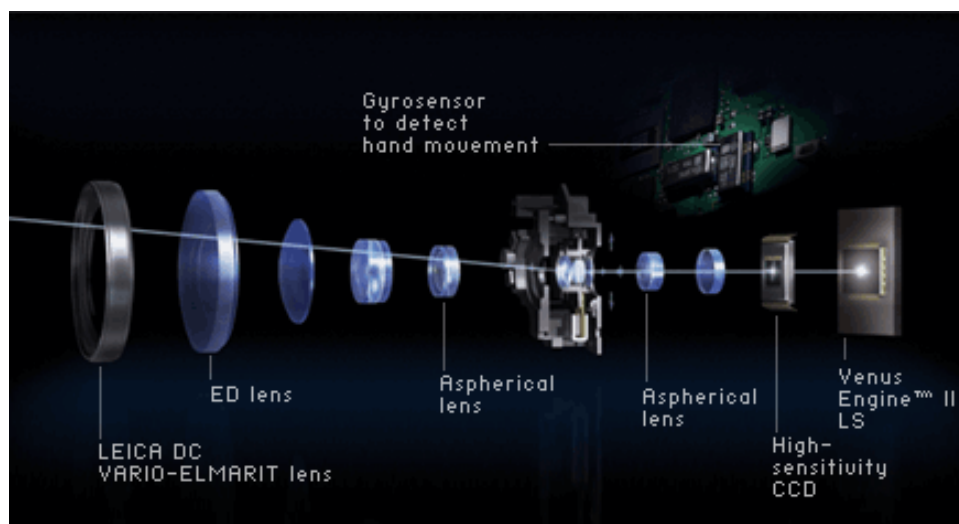
O.I.S. lens moves continuously

- **Compensazione massima**

Lo stabilizzatore interviene nel momento in cui si preme il pulsante di scatto, assicurando la massima compensazione in tutte le direzioni. Poiché la luce è intercettata in prossimità del centro dell'obiettivo, questo modo offre una maggiore nitidezza e risoluzione delle immagini rispetto al precedente.



O.I.S. lens remains near the image center until you shoot



**Optical Stabilization (OS):**

Il sistema messo a punto da Sigma prevede due modalità di intervento dello stabilizzatore:

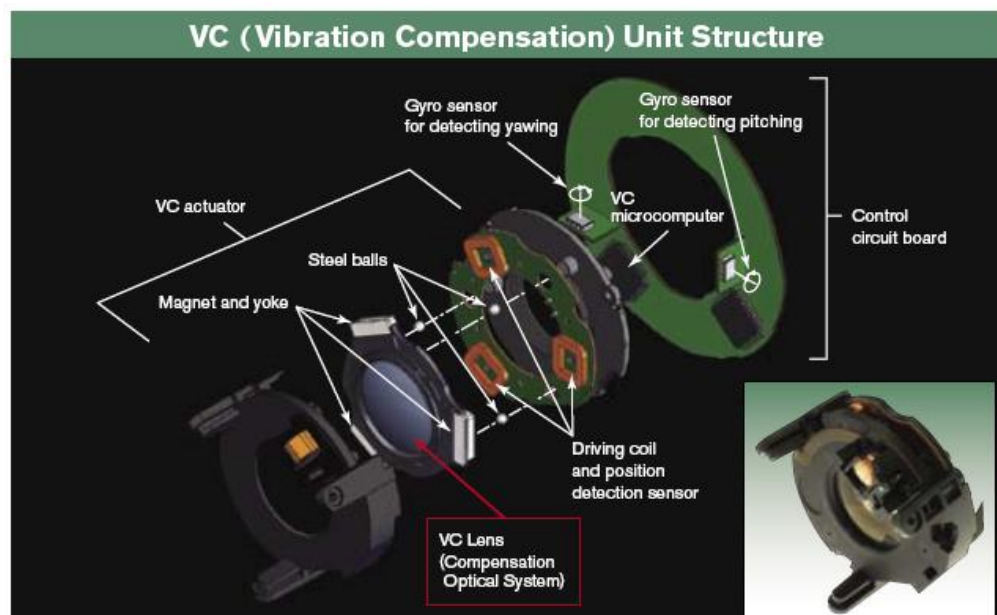
- **Modo 1**  
Determina l'entità delle oscillazioni verticali ed orizzontali della fotocamera facendo intervenire lo stabilizzatore per compensarle. È quindi efficace nelle riprese fotografiche di soggetti tendenzialmente statici ed in quelle di panorami.
- **Modo 2**  
Rileva solo le oscillazioni verticali della fotocamera e le compensa. È efficace nelle riprese fotografiche di soggetti in movimento anche rapido utilizzando la tecnica del panning.

**Tamron**

**Vibration Compensation (VC):**

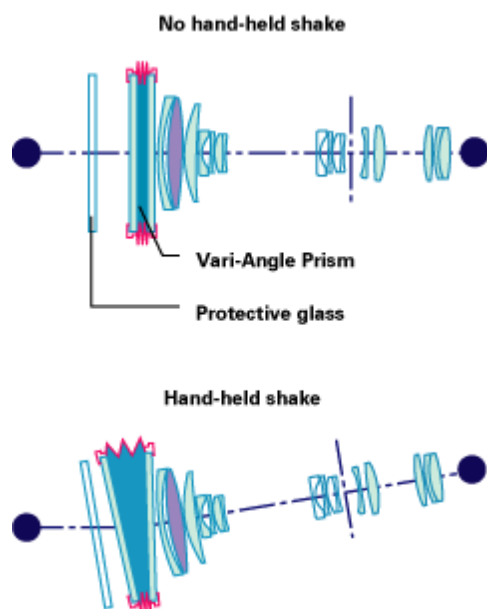
Il sistema messo a punto da Tamron presenta una configurazione triassiale, in quanto utilizza tre coppie di bobine attuatrici e sfere di scorrimento attorno al gruppo ottico mobile dello stabilizzatore. In pratica, le sfere fungono da cuscinetto volvente, conferendo al gruppo ottico mobile migliori prestazioni.

La costruzione compatta comporta una riduzione significativa degli ingombri dell'obiettivo in rapporto alla sua lunghezza focale. Lo stabilizzatore incorpora un sensore giroscopico di elevata precisione per il rilevamento delle oscillazioni nell'uso della fotocamera a mano libera ed un processore RISC a 32 bit per l'elaborazione ad alta velocità dei dati acquisiti.



## Prisma a geometria variabile

È costituito da un liquido ad alto indice di rifrazione che riempie una camera delimitata da due lamine di vetro ottico connesse mediante soffietti flessibili. Variando l'angolazione tra le due lamine, si modifica la rifrazione dei raggi luminosi e quindi il loro cammino.



Il sistema Vari-Angle Prism (VAP) di Canon per binocoli, videocamere e telecamere è più ingombrante e costoso del sistema di traslazione del gruppo ottico e genera un'aberrazione cromatica crescente dal centro ai bordi dell'immagine durante la stabilizzazione, ma è anche in grado di compensare oscillazioni indotte dal tremolio involontario di entità maggiore rispetto al gruppo ottico mobile.

## Stabilizzazione elettromeccanica

La **stabilizzazione elettromeccanica (Electromechanical Image Stabilizing System, EMIS) o CCD-Shift Correction Technology** è stata introdotta sul mercato nel 2003 da Minolta con il nome di **Anti-Shake**. La caratteristica specifica della stabilizzazione elettromeccanica è la traslazione su due assi del fotosensore a stato solido per compensare il tremolio involontario, con il verso di traslazione opposto a quello dell'oscillazione.



Diversamente dagli stabilizzatori ottici, il dispositivo di compensazione delle oscillazioni è quindi integrato nel corpo della fotocamera ed indipendente dall'obiettivo montato. Come già visto per la stabilizzazione ottica, ogni fabbricante denomina la tecnologia EMIS in modo differente dagli altri.

**Olympus**

### ***Supersonic Wave Drive (SWD)***

L'unità di stabilizzazione dell'immagine per la correzione delle vibrazioni integrata nel corpo macchina è ottimizzata per il ***Sistema Quattro Terzi***, che utilizza obiettivi virtualmente telecentrici. Le ultime versioni del firmware delle fotocamere Olympus permettono anche di sfruttare la stabilizzazione dell'immagine con i precedenti obiettivi OM e con gli altri obiettivi che non appartengono alla gamma Quattro Terzi.

L'unità di stabilizzazione dell'immagine integrata possiede due differenti modalità di funzionamento supportate da due differenti elementi:

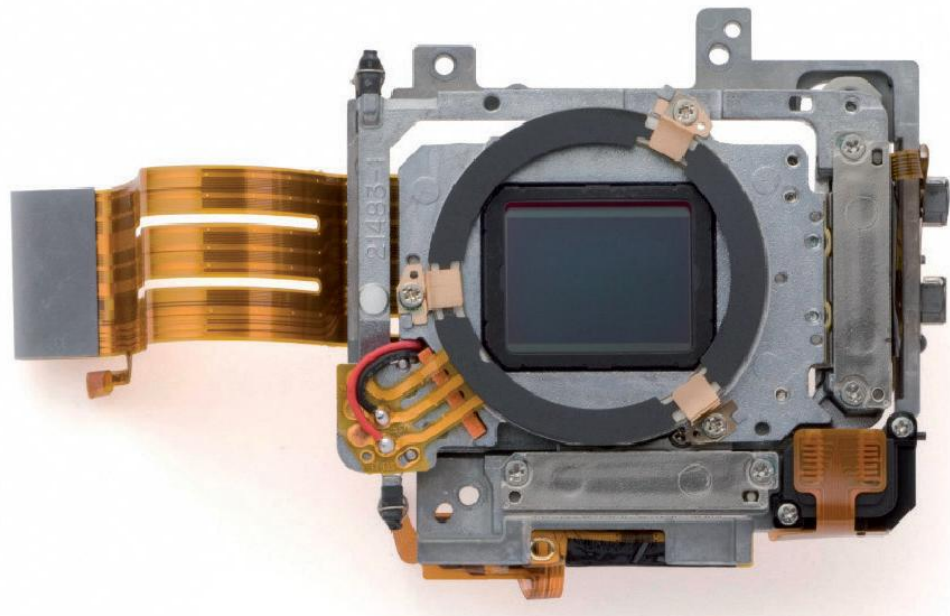
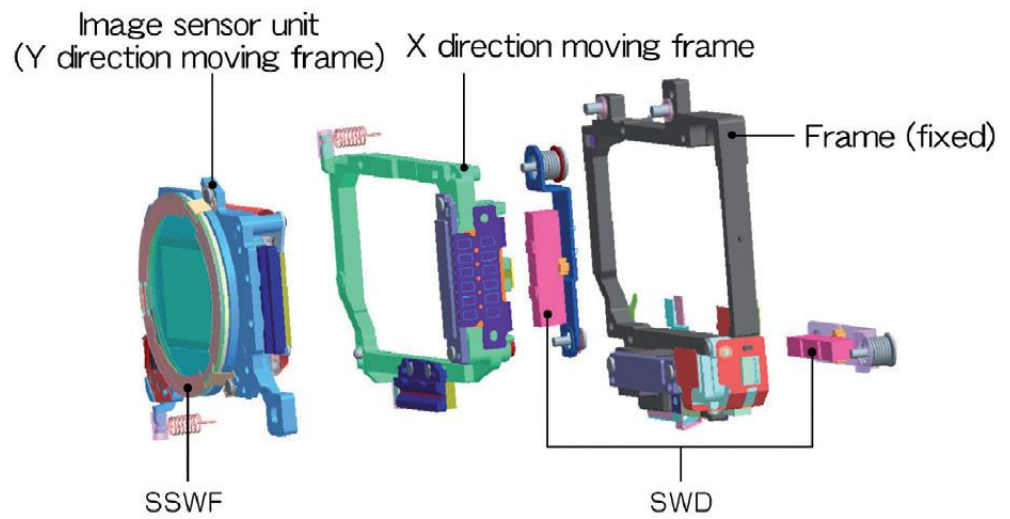
- ***Modo IS 1***

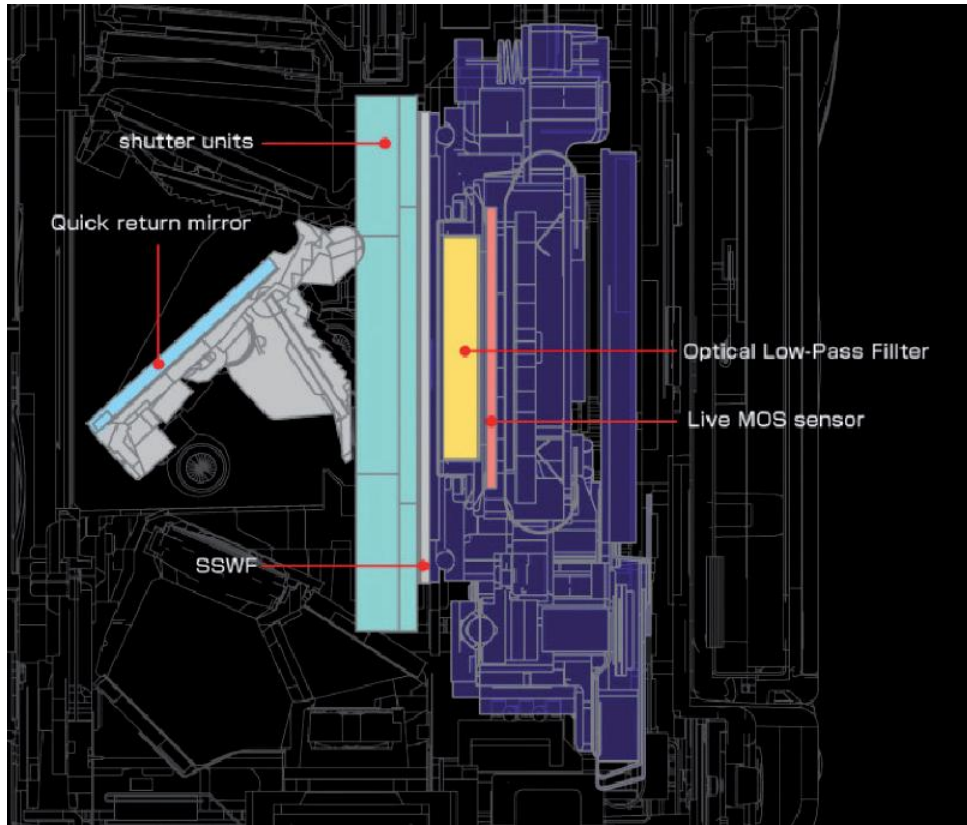
Il sistema effettua correzioni su entrambi gli assi orizzontale e verticale. Questa modalità è particolarmente utile per contrastare il naturale movimento delle mani.

- ***Modo IS 2***

Il sistema disabilita la correzione dovuta al movimento orizzontale, al fine di rilevare e compensare

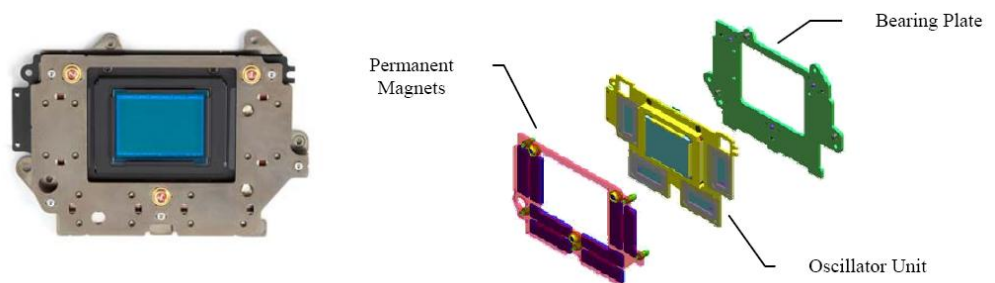
esclusivamente le oscillazioni verticali della fotocamera. Questa modalità è efficace nelle riprese fotografiche di soggetti in movimento anche rapido effettuate utilizzando la tecnica del panning.





***Shake Reduction (SR)***

Il principio di funzionamento dello stabilizzatore elettromeccanico di Pentax è simile a quello del dispositivo ideato da Minolta. Il fotosensore è montato su una piattaforma dotata di cuscinetto a sfere e traslata da attuatori elettromagnetici (invece di quelli piezoelettrici utilizzati da Minolta).





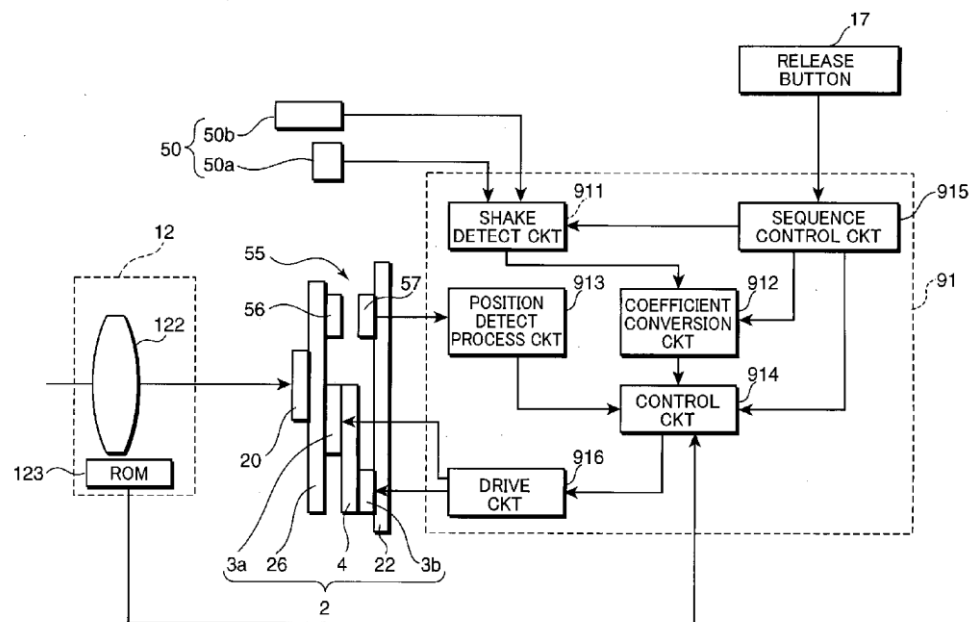
**Sony**

***Super Steady Shot (SSS)***

Nel 2006, Sony ha acquisito la divisione fotografica di Minolta, nel frattempo fusasi con Konica, e da allora utilizza questa tecnologia nella sua linea di fotocamere digitali.



La figura che segue illustra lo schema funzionale del sistema:

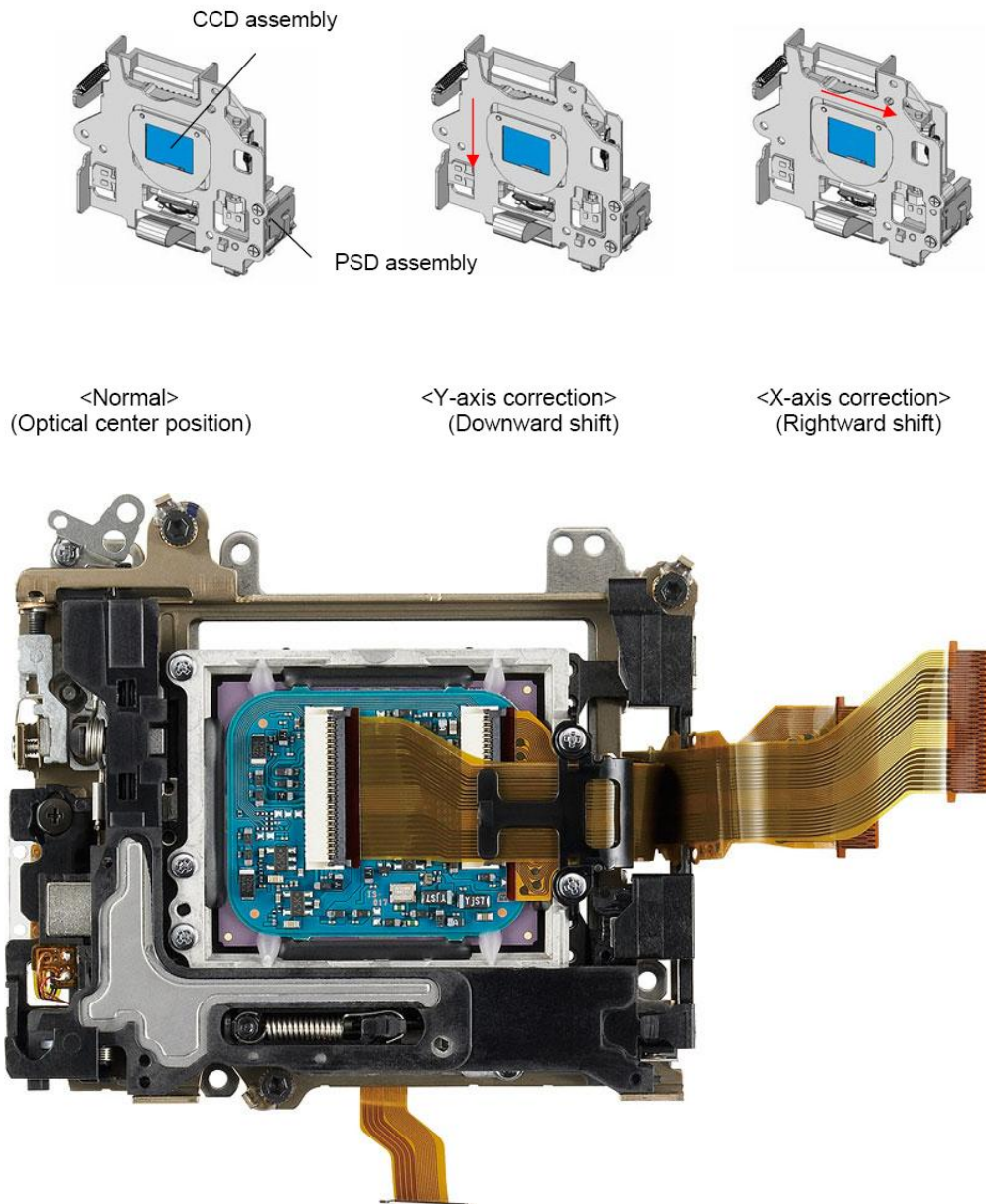


- due sensori giroscopici (50) misurano il tremolio involontario;
- un sensore (55) determina la posizione del fotosensore;
- il microprocessore della sezione di correzione delle oscillazioni (91) elabora i segnali dei tre sensori e calcola



la traslazione necessaria rispetto alla posizione corrente del fotosensore;

- il dispositivo attuatore piezoelettrico (2), di piccole dimensioni e rapido nella risposta, riceve i dati della correzione e trasla il fotosensore fino alla posizione calcolata.



## Stabilizzazione elettronica

La **stabilizzazione elettronica dell'immagine (Electronic Image Stabilization, EIS)**, indicata talvolta come **stabilizzazione digitale**

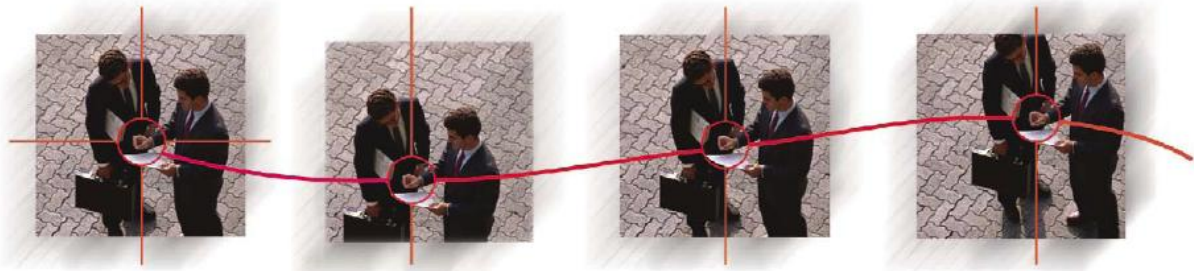
**dell'immagine**, è utilizzabile unicamente in dispositivi con fotosensori allo stato solido (CCD/CMOS). Per eliminare la perdita di nitidezza dell'immagine causata dal tremolio involontario, questa tecnologia si avvale di specifici algoritmi e di fotosensori con area più ampia dell'immagine. La correzione avviene nell'intervallo che intercorre tra la cattura e la registrazione dell'immagine.

L'elaborazione elettronica del segnale presenta il vantaggio di costi di produzione bassi e dimensioni contenute del sistema di stabilizzazione e trova quindi impiego principalmente nelle videocamere.

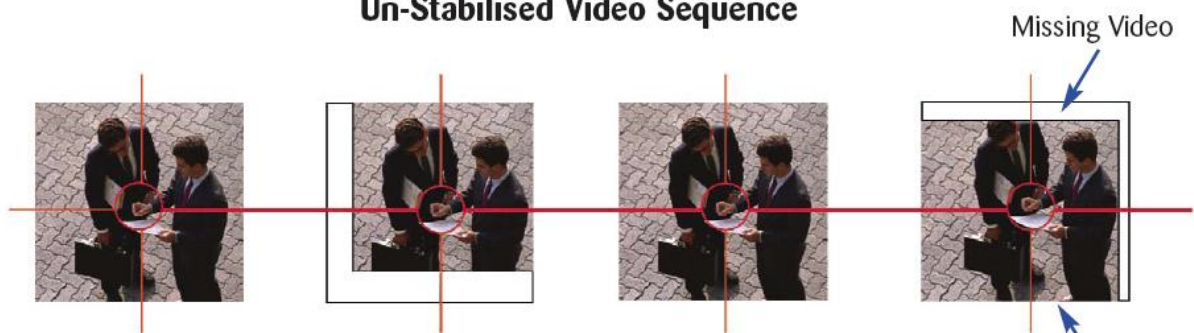
Esistono due modalità di rilevamento del tremolio involontario:

- Il sistema segue alcune aree caratteristiche dell'immagine durante il susseguirsi dei quadri. Le differenti posizioni assunte da queste aree di quadro in quadro sono riconducibili al tremolio involontario. Lo svantaggio di questo tipo di rilevazione è l'eventuale errata interpretazione del movimento di soggetti nella scena come oscillazioni della videocamera.
- Il sistema è dotato di sensori giroscopici per la rilevazione delle oscillazioni della videocamera. La funzionalità è strettamente legata alla qualità dell'algoritmo essendo anche necessario distinguere tra oscillazioni e panning.

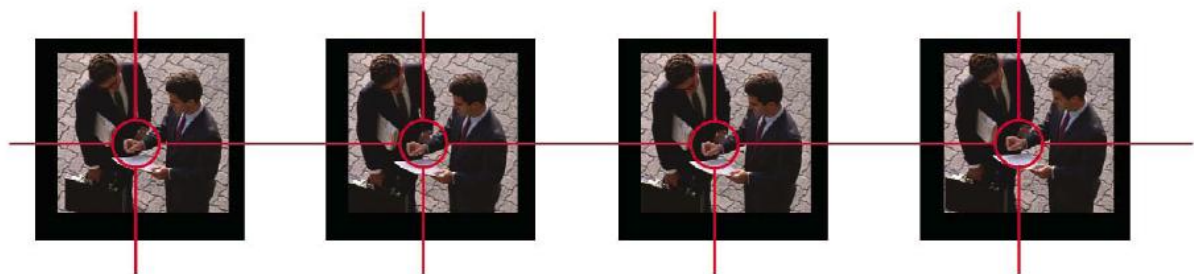
Indipendentemente dalla modalità di rilevamento adottata, il principio di elaborazione dell'immagine è quello illustrato qui di seguito:



**Un-Stabilised Video Sequence**

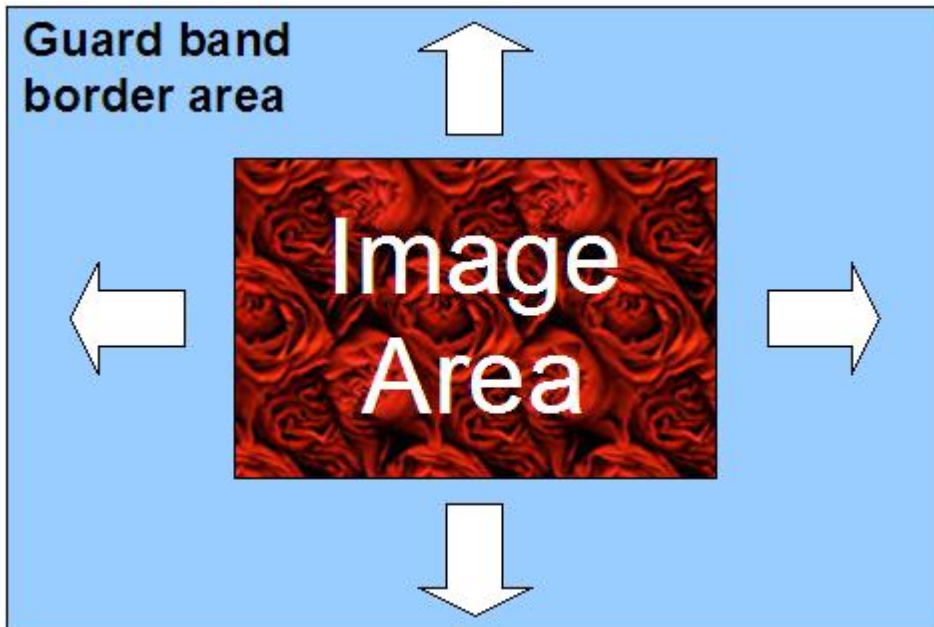


**Stabilised Video Sequence (without Borders)**



**Stabilised Video Sequence (with Borders)**

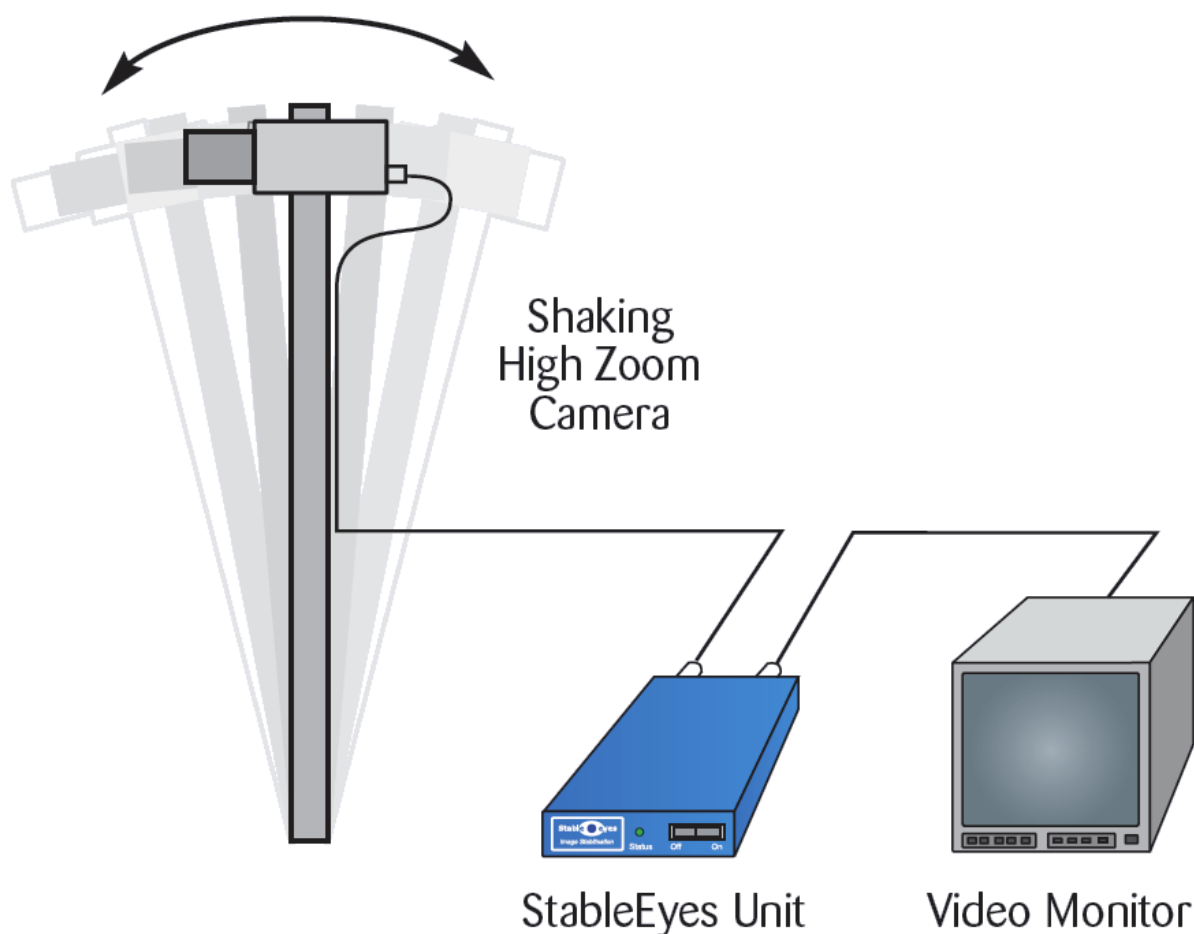
Per traslare i singoli quadri, è necessario disporre di margini sufficienti ai lati dell'immagine o ricorrendo allo zoom digitale o utilizzando un fotosensore sovradimensionato. In questo secondo caso, l'immagine focalizzata è più piccola del fotosensore e quindi "fluttua " sulla sua superficie mentre la videocamera oscilla.



Poiché il sistema sfrutta tutta l'area del fotosensore, compresi i margini, l'unità di elaborazione del segnale è in grado di procedere alla compensazione digitale dell'oscillazione dell'immagine.

Ciascun metodo presenta degli svantaggi: lo zoom digitale rifila l'immagine scartando i ritagli con conseguente perdita di informazioni e riduzione della qualità, mentre il fotosensore sovradimensionato è più costoso e la compensazione è limitata dalla larghezza dei margini esistenti.

La stabilizzazione elettronica può essere utilizzata non solo integrandola nel dispositivo di acquisizione, ma anche in una specifica unità esterna per il controllo di video/telecamere (in grado di sfruttare unicamente il metodo dello zoom digitale), come nella seguente applicazione **TV a circuito chiuso (Closed Circuit Television, CCTV)**:



## Stabilizzazione meccanica

---

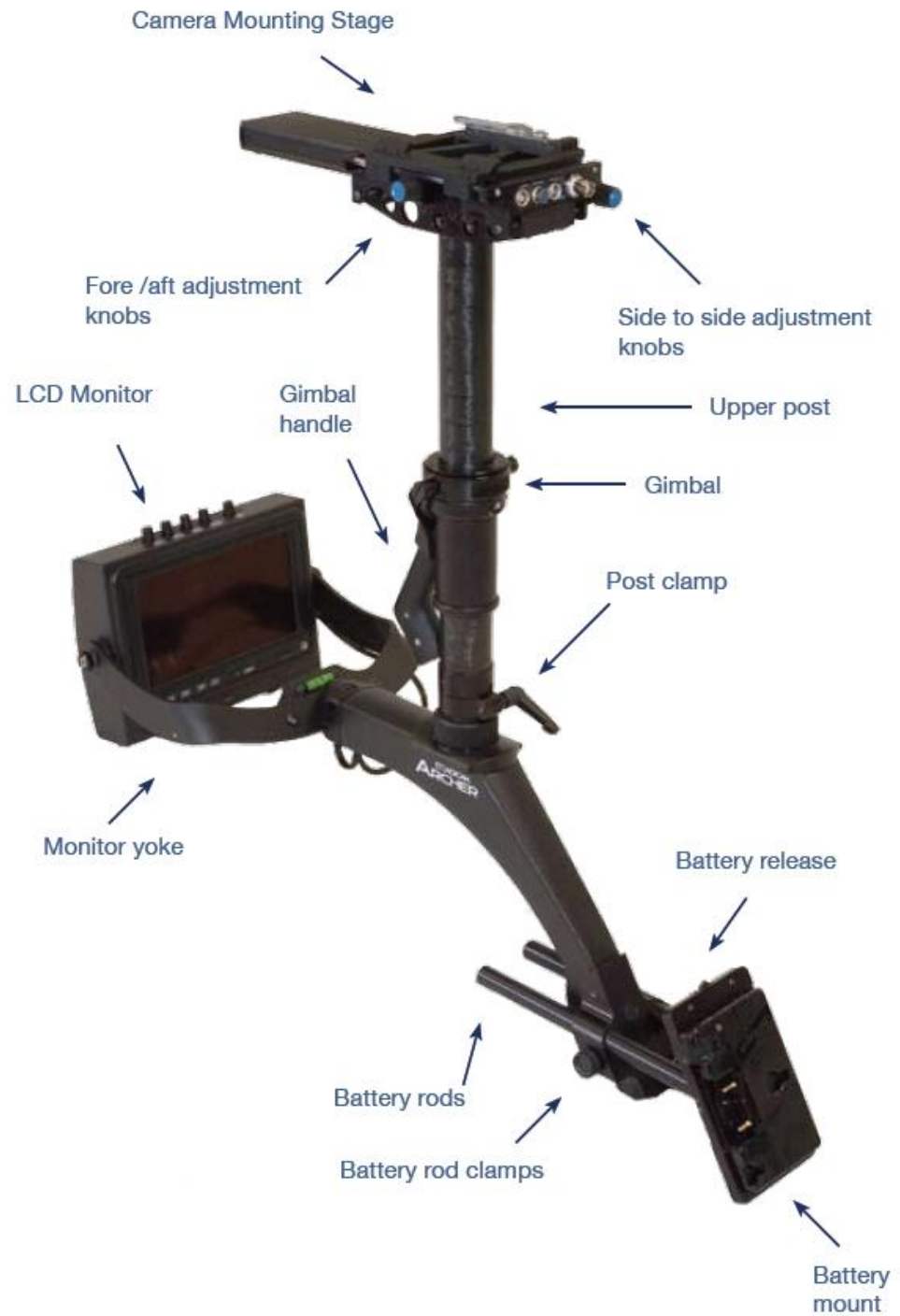
È il sistema di più vecchia data per la riduzione delle oscillazioni di fotocamere, video/telecamere e cineprese. È ovvio che il modo più semplice per annullare gli inconvenienti derivanti dal tremolio involontario è di rinunciare all'utilizzo a mano libera delle suddette attrezzature. Questo sistema di stabilizzazione ha effetto sull'intero dispositivo di acquisizione delle immagini e non solo su una o più delle sue parti.

Il tradizionale mezzo di supporto antivibrazioni, e solitamente il più economico, è costituito da treppiedi e monopiedi. Tuttavia, si possono avere oscillazioni anche usando il treppiede, a causa di movimenti meccanici interni al dispositivo di acquisizione (specchio a ritorno rapido, otturatore, ecc.). Questo tipo di oscillazioni ha caratteristiche differenti dal tremolio involontario e può essere eliminato mediante sistemi di stabilizzazione ottica. Altri sistemi di stabilizzazione più sofisticati e recenti

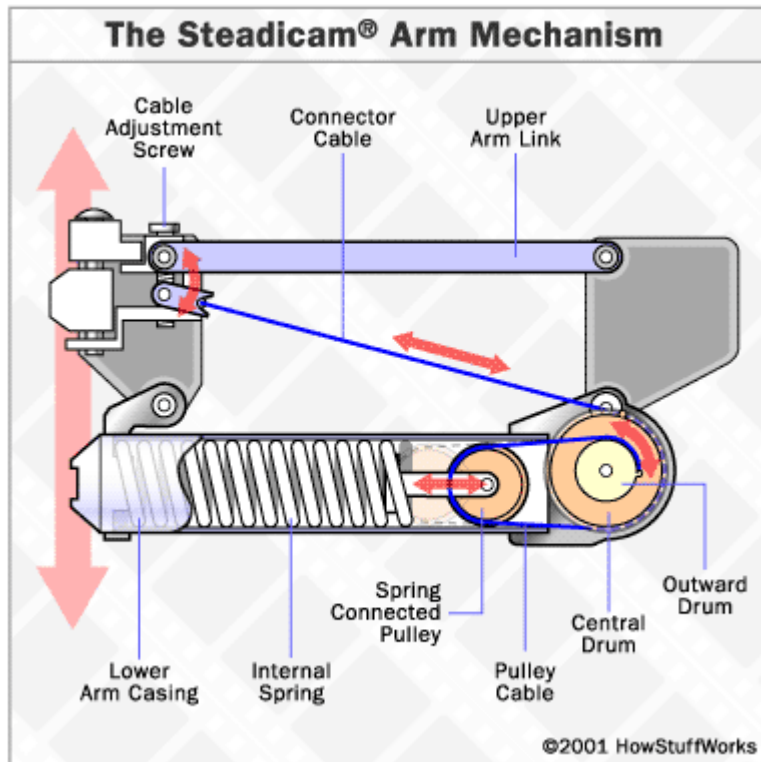
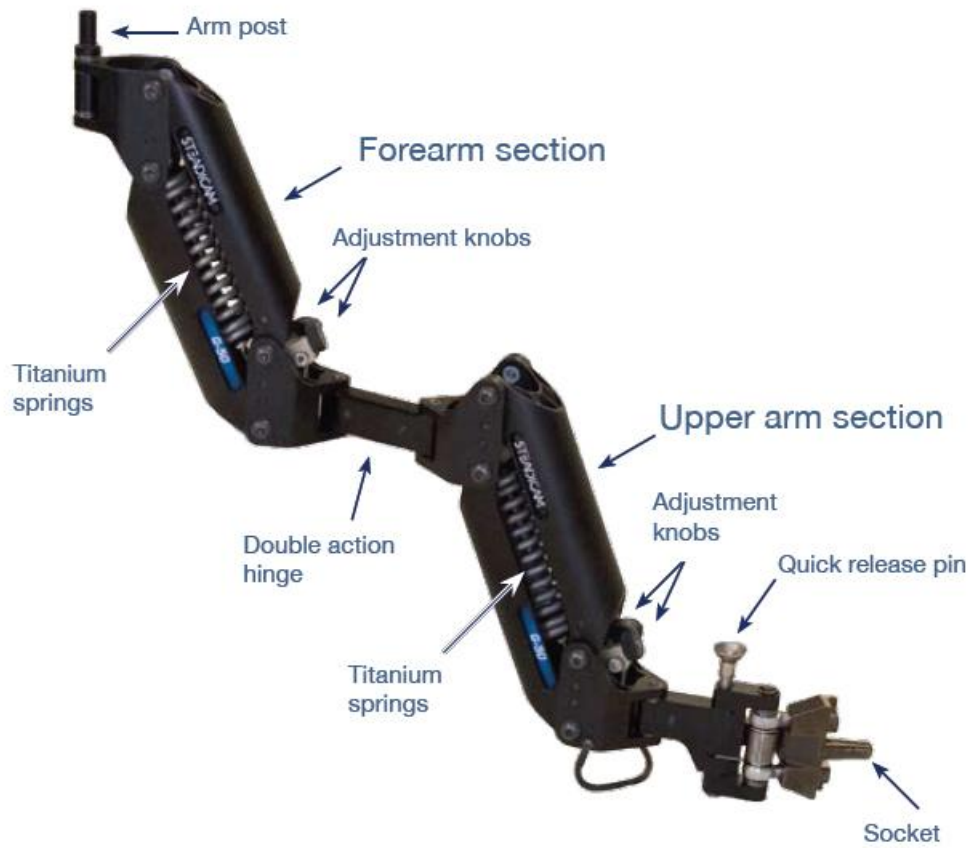
sono, ad esempio, quello Steadicam e gli stabilizzatori giroscopici. Poiché lo stabilizzatore meccanico non è integrato nel corpo macchina o nell'obiettivo, è in grado di supportare tutti i tipi di fotocamere, video/telecamere e cineprese.

**Steadicam**

Steadicam è un sistema messo a punto per riprese con cineprese e telecamere. L'apparecchiatura di ripresa, il monitor e la batteria sono montati su una colonna.



La colonna è fissata ad un braccio snodato a molle regolabili.







Il braccio è agganciato ad un giubbotto che viene indossato dall'operatore.

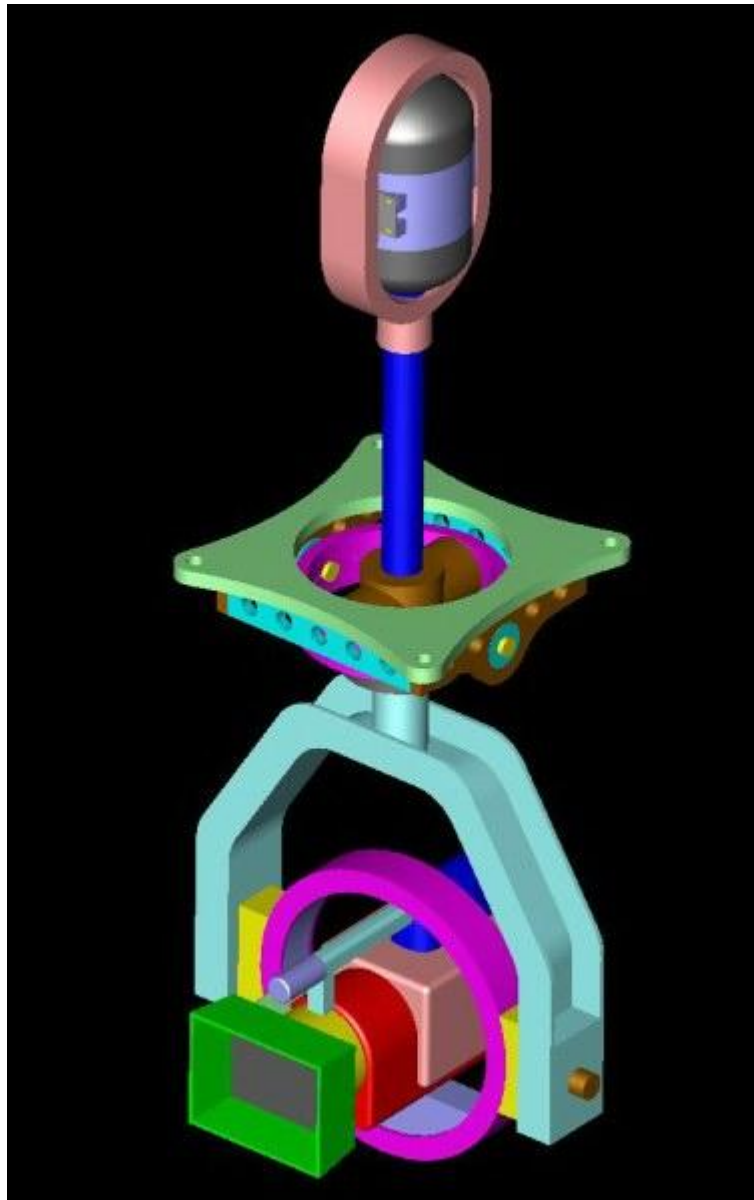


Il peso del sistema dipende dal modello, ma raggiunge comunque alcuni chilogrammi, mentre il costo è nell'ordine delle migliaia o decine di migliaia di euro (fino a circa € 50.000). L'efficacia di questo tipo di stabilizzatore è direttamente legata alla perizia tecnica dell'operatore.



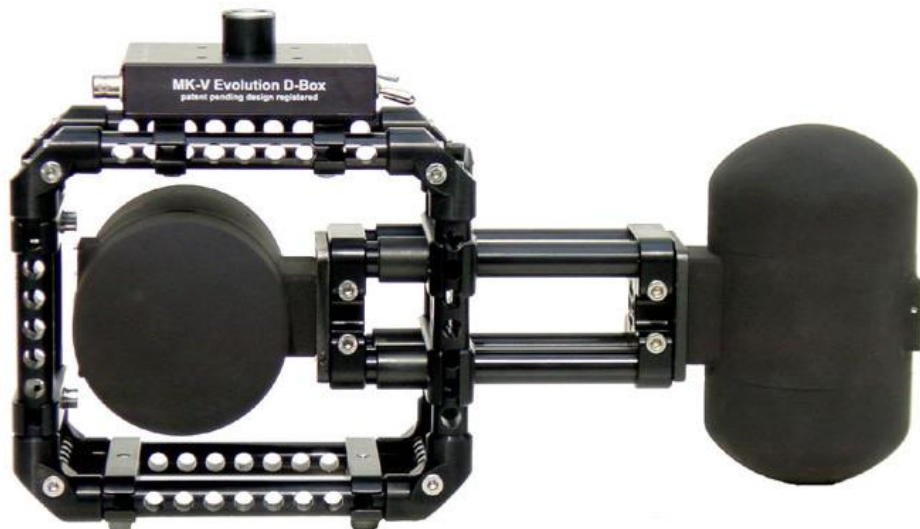
**Giroscopi  
stabilizzatori**

Gli stabilizzatori giroscopici sono un compromesso tra il treppiede e l'uso a mano libera delle fotocamere, video/telecamere e cineprese. Sono utilizzabili con un'ampia gamma di apparecchiature di ripresa ed in combinazione con altri sistemi di stabilizzazione, come Steadicam.





Ad esempio, Kenyon Laboratories commercializza questo tipo di stabilizzatori, costituiti da una capsula caricata ad elio e contenente due giroscopi ad assi contrapposti, che ruotano a circa 20.000 giri/min. Montando due stabilizzatori ad assi ortogonali, è possibile contrastare il beccheggio e l'imbardata dell'apparecchiatura di ripresa.



La stabilizzazione giroscopica ha un costo non indifferente (da qualche migliaio a varie decine di migliaia di euro), genera

rumore, necessita di alimentazione elettrica assicurata da batterie a 12/24 V ad alta capacità ed ha tempi di avvio e di arresto dei giroscopi dell'ordine della decina di minuti. Queste caratteristiche la rendono inadatta all'impiego generalizzato.





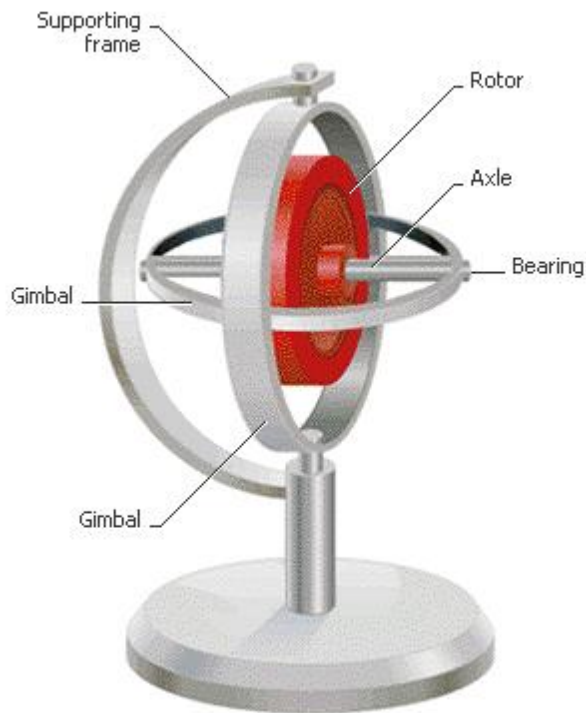
## Sensori giroscopici

---

Il segnale in uscita dai sensori giroscopici è proporzionale alla loro velocità di rotazione, rendendoli idonei alla rilevazione delle oscillazioni indotte nelle apparecchiature dal tremolio involontario o da altri dispositivi. La gran parte dei sistemi di stabilizzazione si basa su questo tipo di sensori.

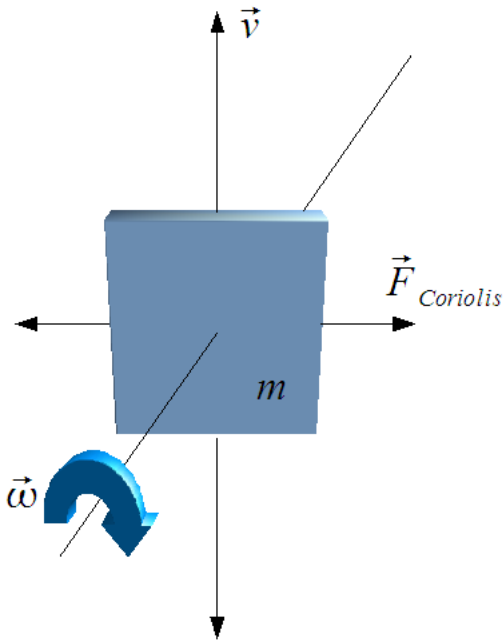
***I sensori giroscopici, anche noti come sensori di velocità angolare o di frequenza angolare, sono sensori inerziali.***

Il giroscopio è un dispositivo fisico rotante che, per effetto della legge di conservazione del momento angolare, tende a mantenere il suo asse di rotazione orientato in una direzione fissa. Essenzialmente, è costituito da un rotore in rotazione intorno al suo asse: quando il rotore è in rotazione, il suo asse tende a mantenersi parallelo a sé stesso ed ad opporsi ad ogni tentativo di cambiare il suo orientamento. Se il rotore è installato su una sospensione cardanica che gli consente di orientarsi liberamente nelle tre direzioni dello spazio, il suo asse si manterrà orientato nella stessa direzione anche nel caso che il supporto cambi orientamento.

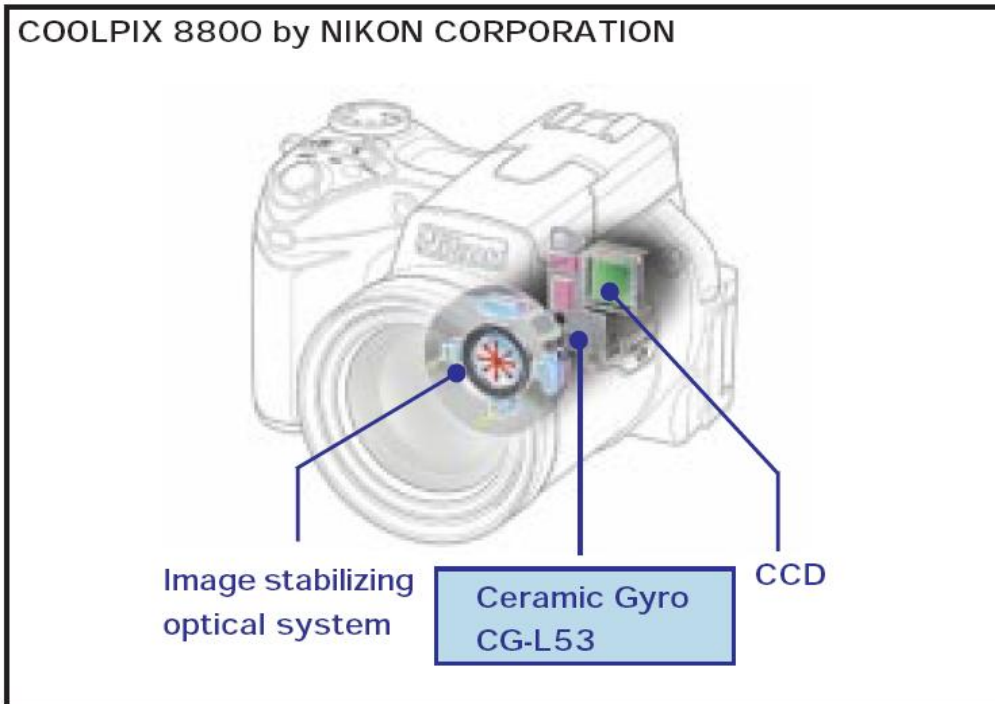


Grazie alla tecnologia **Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS)** ed alla **microlitografia**, è possibile miniaturizzare a costi accessibili i giroscopi, sostituendo il rotore con un elemento in grado di vibrare e rendendo così inutile la presenza di cuscinetti a supporto del meccanismo. In generale, si distingue tra giroscopi ottici e giroscopi meccanici. Questi ultimi sono gli unici miniaturizzabili e quindi utilizzabili nei sistemi di stabilizzazione di fotocamere, videocamere o telefoni cellulari. Per comprendere il principio di funzionamento dei giroscopi, si consideri una massa  $m$  che vibra con velocità  $\vec{v}$  (risonatore). Se si ruota il giroscopio con velocità angolare  $\vec{\omega}$ , la massa è soggetta ad uno spostamento supplementare causato dalla forza di Coriolis  $\vec{F}_{Coriolis}$ . La direzione di questo piccolo spostamento è perpendicolare a quella del moto di vibrazione ed all'asse di rotazione. La forza di Coriolis è data da:

$$\vec{F}_{Coriolis} = -2m(\vec{v} \cdot \vec{\omega})$$



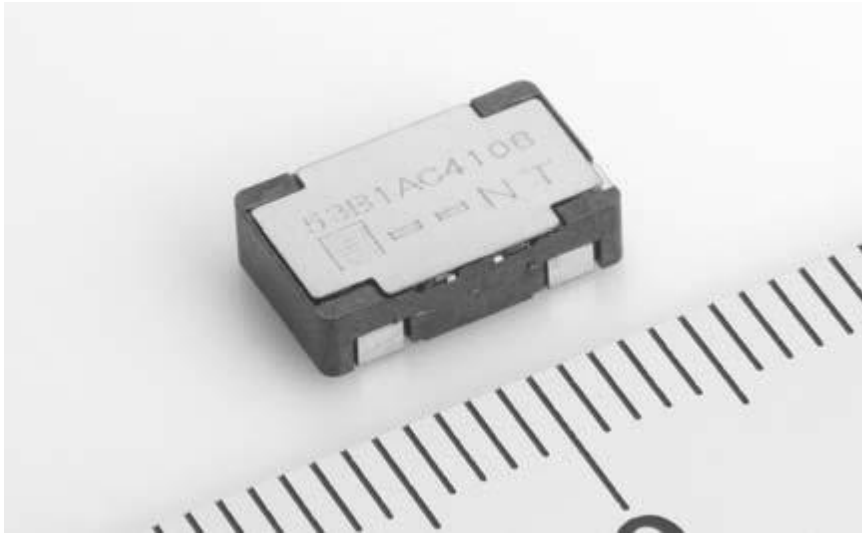
Per il risonatore, si possono usare diversi materiali: quarzo, silicio o ceramiche piezoelettriche. Ad esempio, la fotocamera Nikon Coolpix 8800 utilizza sensori giroscopici CG-L53 di NEC TOKIN, basati su risonatori in ceramica piezoelettrica.



Ad un costo di \$ 10 al pezzo, il sensore giroscopico CG-L53 è in grado di rilevare oscillazioni comprese nell'intervallo 0,1-1500 gradi/s con un



segnale in uscita di 0,66 mV/grado/s ed un consumo elettrico inferiore a 10mW.



### What is Gyroscope?

