



L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

L'Evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

“ intervento - dibattito al Convegno delle Associazioni Astrofili Liguri “
– Sestri Levante

Relatore: Enrico Ronchi, responsabile tecnico di Arcturus

La fotografia su pellicola, storia

Il CCD, accenni storici

Il CCD, notizie tecniche di base

La fotografia con i CCD, parametri principali

Le Webcam, in astronomia, cenni generali



L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

La fotografia su pellicola

Il pittore Louis Jacques Mandé Daguerre (1787-1851), nel 1824, cominciò a cercare la maniera di riprodurre le immagini della camera oscura. Il procedimento per ottenere immagini fotografiche fu scoperto casualmente da Daguerre nel 1835 utilizzando come materiale sensibile una lastra di rame argentata e sensibilizzata con cristalli di iodina per esposizione a vapori di iodio: chimicamente parlando si deponesse sul rame uno strato sottile di ioduro d'argento, la lastra cambiava colore e diventava azzurra e quindi veniva esposta in una camera oscura. Daguerre scoprì che, sebbene anche con esposizioni di 3 o 4 ore si formasse un'immagine appena visibile, se si esponeva la lastra ai vapori di mercurio allora bastavano pose di 3 o 4 minuti per ottenere una immagine ben contrastata. Poi fissava con il comune sale da cucina, in seguito abbandonato per l'iposolfito. Daguerre ottenne una immagine della luna, in effetti soltanto una impronta biancastra sulla solita lastra di rame ma ciò fu sufficiente per dimostrare la possibilità di ottenere immagini fotografiche dalla radiazione lunare. Questa scoperta infiammò l'astronomo e uomo politico francese Arago che comunicò per la prima volta l'idea dell'invenzione di Daguerre nella Sessione Straordinaria dell' Accademia delle Scienze e delle Belle Arti del 1839. Arago indicò chiaramente la maggior parte delle future applicazioni astronomiche della fotografia:

- 1) registrazione fedele e semplice degli aspetti fisici degli astri
- 2) misura del loro splendore
- 3) studio spettrale della loro luce

In quel periodo si ottennero le prime soddisfacenti registrazioni del Sole (1842 e 1845), della Luna (1840 e 1850) e di un'eclisse solare totale (18 luglio 1851).

Nel 1840 il fisico americano J.W. Draper (padre dell' astronomo Henry Draper) aveva ottenuto su lastre di Daguerre, con il supporto di un telescopio newtoniano di 13 cm di apertura, un lungo fuoco e un tempo di posa di 20 minuti, immagini della Luna di 25 mm di diametro.

Nel 1850 con un cannocchiale equatoriale di 38 cm dell'osservatorio di Harvard College (Massachusetts), il primo direttore dell' osservatorio, W.C. Bond, ottenne una serie di

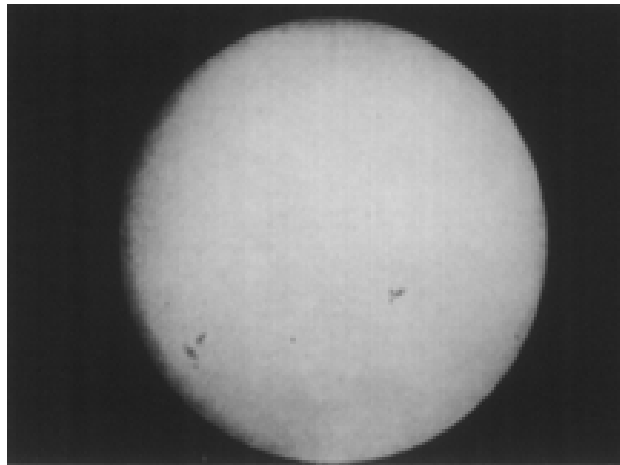
L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

dagherrotipi, con posa di 40 secondi circa, in cui l'immagine della Luna aveva 12 cm di diametro. Tali immagini vennero presentate nel 1851 nell'esposizione universale di Londra suscitando l'ammirazione di tutti e rinnovando l'interesse degli astronomi. Durante l'eclisse parziale di Sole del 15 marzo 1858, l'astronomo francese H. Faye, riuscì ad ottenere un'immagine di 14 cm di diametro con un obiettivo di 0,52 m di apertura e 15 m. di focale che mostrava le facole delle macchie marginali, e le venature più fini che solcano i bordi del Sole.

Sino al 1880 la fotografia raggiungeva gli stessi risultati dell'occhio, poi poco per volta il metodo fotografico superò sempre più largamente le possibilità dell'osservazione visuale, sostituendosi poi completamente ad essa. Il primo risultato sensazionale di questa nuova epoca fu la **scoperta delle nebulose**. Le lastre ottenute all'**Osservatorio di Lick** tra il 1895 e il 1913 mostrarono circa **700.000 nebulose**, mentre il catalogo contemporaneo NGC, effettuato visualmente, ne conteneva meno di **8.000**.

Daguerrotipo del Sole ottenuto da Fizeau e Foucault il 2 aprile 1845 all'Osservatorio di Parigi. Sono visibili le macchie solari e l'assorbimento dei bordi del disco. (Fig 1)

Foto 1



A partire dal 1871 si ha l'introduzione delle lastre secche al bromuro d'argento: nuova sensibilità e vero inizio della fotografia astronomica.

Nel biennio 1881-1882 grazie a J. C. Janssen, Common, Draper, W. Huggins e Gill, si

L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

fotografano le grandi comete . Dal 1880 Draper ottenne la prima fotografia di una nebulosa, M 42 in Orione (Foto 4).

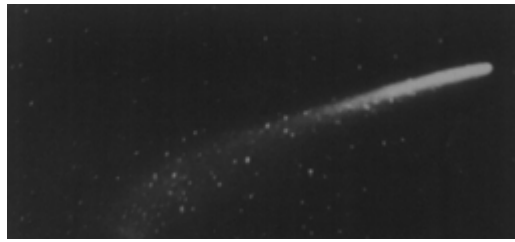


Foto 2

7-11-1882: Osservatorio del Cap, cometa con sullo sfondo un certo numero di stelle. Posa di 110'. la sensibilità delle "pellicole" è aumentata a livelli accettabili. Foto realizzata da D.Gill (Foto 2)

Oggi una pellicola a colori è composta strati sovrapposti di filtri e emulsioni secondo uno schema tipico (Fig 1)

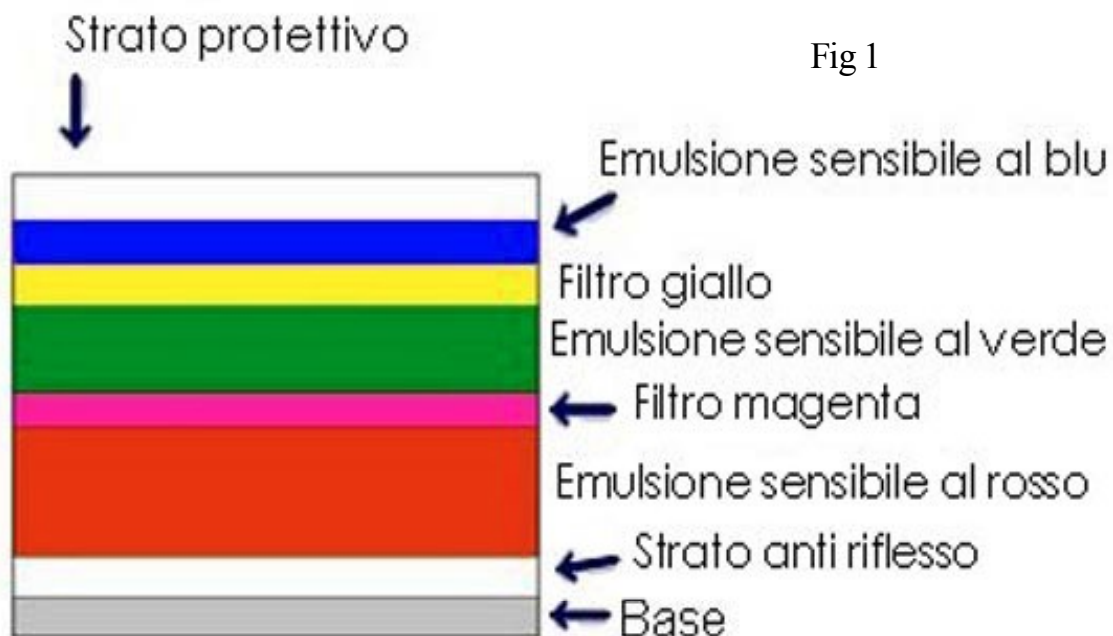


Foto 3: Agosto 2003: Fotografia nebulosa "Nord America" NGC7000 (particolare)

Obiettivo 300 mm, pellicola Dia 400 ASA, esposizione 17'

Per gentile concessione di Roberto Brugo, socio di Arcturus.

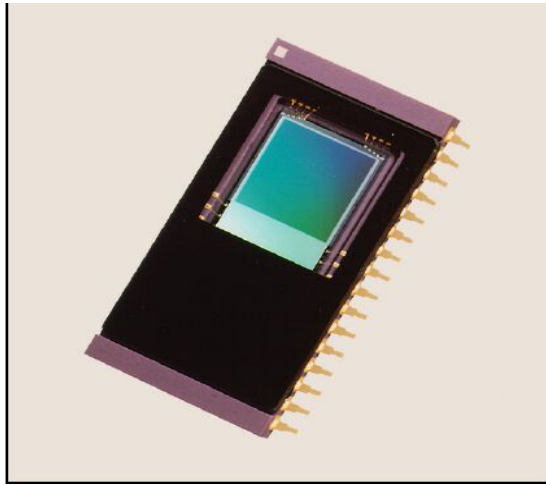
Foto 3



Foto 4: Gennaio 2004 : Skymaster 150/1000 CCD ICX098AK 15" [640 x 480] foto Autore



II CCD



Il CCD (Charge-coupled device, dispositivo ad accoppiamento di carica) è nato presso i laboratori Bell di Murray Hill, New Jersey, nel 1969. Il CCD è un dispositivo caratterizzato da una matrice di microscopiche regioni di forma quadra o rettangolare, disposte a scacchiera sulla superficie di un cristallo di silicio, opportunamente trattato e integrato in un microchip. Tali regioni, fotosensibili, sono denominate pixel (picture elements), e sono ricavate direttamente nel silicio con processi di microlitografia, come del resto tutti i cip MSI odierni.



L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

La camera CCD

Se sostituiamo la pellicola di una macchina fotografica tradizionale con un sensore CCD e equipaggiamo la nostra macchina con un'elettronica e un software capaci di registrare e riprodurre immagini digitali, abbiamo ottenuto una camera CCD.

La zona sensibile del sensore è paragonabile a quella di un'emulsione fotografica: alla matrice dei pixel corrisponde la grana dell'emulsione. La dimensione del sensore generalmente utilizzato nelle camere CCD è di pochi millimetri quadrati (da un minimo di 4 a un massimo di 100) rispetto agli 864 del campo di una 24 x36.

La superficie di un'emulsione fotografica è composta da grani fotosensibili le cui dimensioni sono generalmente più grandi di quelle del pixel di un CCD e con una distribuzione non uniforme.

Nei CCD i pixel sono disposti in una matrice quadrata o rettangolare, e sono ovviamente tutti identici e spazati in modo regolare secondo righe e colonne. La disposizione e la configurazione dipendono dall'uso specifico del CCD.

Durante una ripresa l'immagine, focalizzata sulla matrice del CCD, produrrà in ogni pixel delle cariche elettriche, in numero proporzionale all'intensità luminosa, al tempo di esposizione ed alla efficienza quantica, funzione della lunghezza d'onda della luce incidente.

Durante l'esposizione si formerà una mappa elettronica dell'immagine dell'oggetto. Il processo di integrazione è generalmente lineare ed esente dal cosiddetto difetto di reciprocità presente nelle emulsioni fotografiche. Il rendimento di conversione fotone-elettrone è dal 10% al 60% rispetto al 2-3% dell'emulsione fotografica (al centro della curva di sensibilità) quindi con assai maggior sensibilità del CCD rispetto all'emulsione fotografica.

Al termine dell'esposizione l'immagine elettronica memorizzata nel substrato del sensore sarà disponibile come segnale elettrico, pronto per la digitalizzazione e elaborazione.

I pixel hanno superfici molto piccole, di pochi micron di lato, adiacenti l'un all'altro a formare una superficie a scacchiera interamente sensibile alla luce. Le zone che dividono i



L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

pixel, chiamata zona morta, è, salvo rare eccezioni, molto piccola e non crea apprezzabili discontinuità di sensibilità luminosa sulla superficie del sensore. Alcuni CCD dotati di anti-blooming laterale presentano una griglia di zone morte, ossia insensibili alla luce, pari anche al 30% dell'intera superficie del sensore. I modernissimi CCD Interline Transfer Sony, dotati di una struttura di anti-blooming e di registri verticali di lettura e schermatura dell'immagine, presentano anch'essi una piccola zona morta, non superiore comunque al 10% dell'intera superficie del sensore.

L'organizzazione interna dei CCD dipende dal tipo di trasferimento delle cariche ed in particolare abbiamo tre tipi fondamentali di readout: Interline Transfer, Frame Transfer o Full Frame Transfer ed è possibile in molti casi evitare lo shutter esterno utilizzando il cosiddetto otturatore elettronico. Il Full_Frame_Transfer è l'unico tipo di CCD che necessita obbligatoriamente di shutter esterno, non possedendo una memoria locale di transito.



L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

Vediamo in dettaglio le diverse configurazioni:

Interline Transfer

Ad ogni colonna di elementi fotosensibili è associata una colonna di registri. Al termine del periodo di integrazione le cariche che si sono venute ad accumulare sui pixel sono trasferite in tempi estremamente brevi sui registri verticali. E' possibile trasferire i dati all'host con tempistiche scelte dall'utente. La tecnica del registro verticale crea automaticamente un otturatore elettronico che arriva ai millesimi di secondo.

Frame Transfer

Due CCD in un CCD. Esiste una zona di memoria identica a quella sensibile alla luce. Al termine dell'integrazione le cariche sono trasferite in pochi millisecondi tra le due zone. L'host può leggere le informazioni con le tempistiche più idonee. Anche in questo caso il sistema crea automaticamente un otturatore elettronico che arriva al millesimo di secondo.

Full Frame Transfer

E' la struttura più semplice. La lettura delle cariche, al termine del periodo di acquisizione, avviene mediante trasferimento progressivo verticale del contenuto delle righe della matrice del sensore. Questo processo è tipicamente dell'ordine del secondo e durante questo periodo è obbligatorio attuare un otturatore esterno per evitare il difetto di smearing

Altri fattori sono estremamente importanti:

Efficienza Quantica (Quantum Efficiency) e Sensibilità Spettrale

L'efficienza quantica ad una certa lunghezza d'onda esprime il rapporto tra il numero di fotoni incidenti al secondo su di un pixel e il numero di fotoelettroni prodotto. E' solitamente espresso in percentuale, è sempre $< 100\%$ ed indica la sensibilità teorica di un CCD. Il costruttore di CCD offre nelle specifiche tecniche anche l'efficienza quantica in funzione della lunghezza d'onda. I CCD BN hanno in genere una efficienza quantica utilizzabile tra il medio infrarosso e l'ultravioletto.

Nel caso di CCD con filtri integrati (RGB) la sensibilità alle varie lunghezze d'onda è modificata dai filtri stessi.

Fig 2

Spectral Sensitivity Characteristics (excludes lens characteristics and light source characteristics)

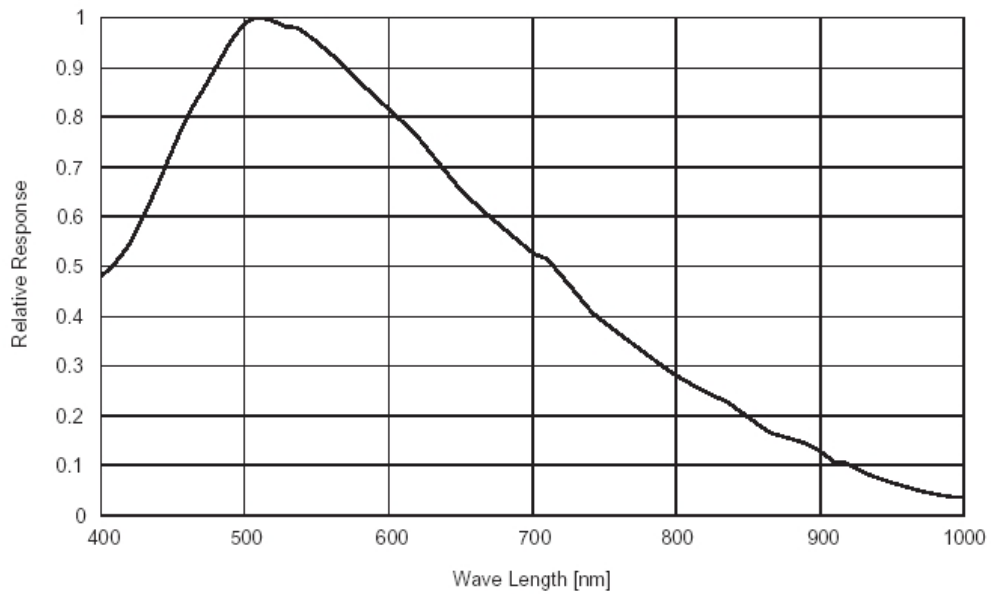
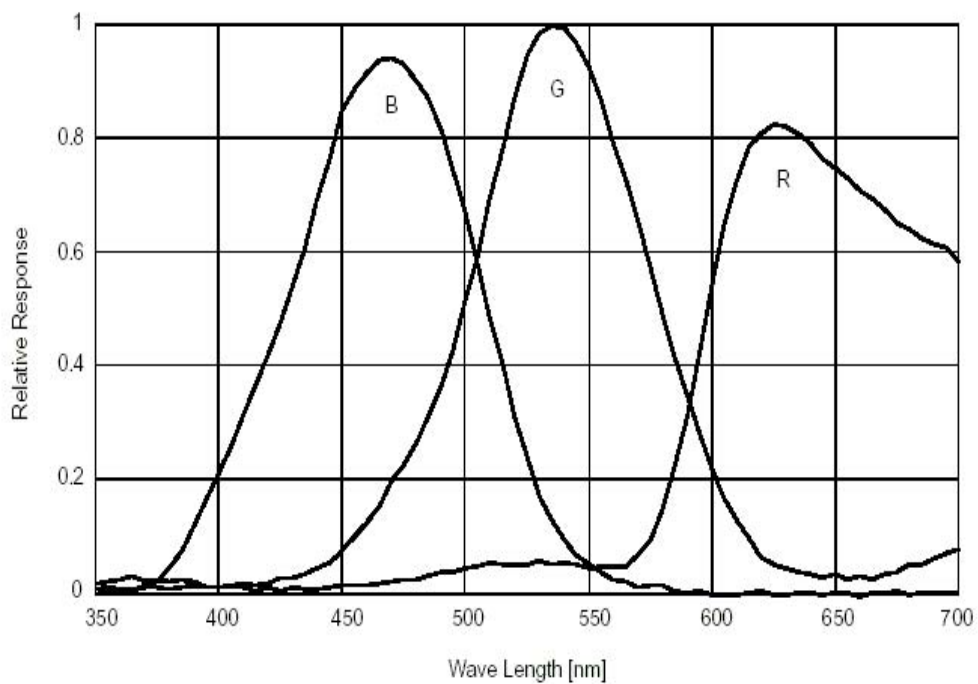


Fig 3

Spectral Sensitivity Characteristics (includes lens characteristics, excludes light source characteristics)





L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

Nel procedo produttivo dei CCD non si ottiene mai una efficienza quantica rigorosamente uniforme su tutta la superficie. Anche se in genere tale problema è facilmente risolvibile tramite una mappa di flat, questo è da considerarsi comunque un parametro importante.

Specialmente per l'uso astronomico ove è richiesta una grande dinamica è importante la misura della capacità elettronica per pixel (Full Well Capacity) ossia del numero massimo di fotoelettroni che possono " stare " su di un pixel.

Altro problema, risolvibile tramite una mappa di dark è legata al rumore di fondo. Tale rumore può essere diminuito **raffreddando** il CCD e diminuisce di un **fattore due** per una **diminuzione di 6 gradi** di temperatura.

Quando si ha la saturazione di un pixel si assiste al fenomeno del blooming ossia del travaso di fotoelettroni lungo le colonne con conseguente degradamento delle immagini.

Quasi tutti i CCD di ultima generazione possiedono tecniche di anti-blooming anche se in genere a discapito della sensibilità. Il CCD è un rivelatore perfettamente lineare almeno non considerando l'estrema regione della saturazione e pertanto si ottengono i seguenti vantaggi :

La soglia minima di rivelazione è data dal rumore medio complessivo presente dell'immagine.

Il CCD non soffre dell'effetto Schwarzschild ossia di reciprocità, manterrà la stessa sensibilità ed efficienza quantica indipendentemente dalla durata dell'esposizione.

La linearità consente di effettuare misure dirette di luminosità degli oggetti (fotometria di precisione)

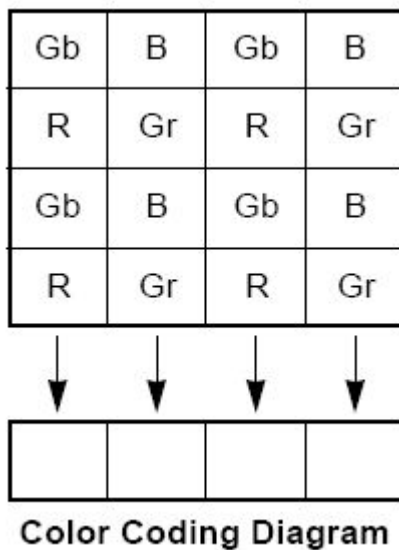
Le Webcam sono delle piccole camere CCD nate principalmente per il mondo della informatica. Sono costruite però con CCD di buona qualità e in genere è possibile modificarle per adattare all'uso astronomico.

Le principali modifiche consistono:

- Eliminazione dell'ottica, in genere scadente, e creazione di un opportuno adattatore per l'interfaccia diretta con il telescopio.
- Modifiche relative all'elettronica per sganciare l'otturatore elettronico e gestirlo in modo diretto dal computer. Si ottengono tempi di acquisizione virtualmente illimitati.
- Possibile raffreddamento del CCD tramite celle Peltier
- Modifiche del software di gestione per recuperare immagini in formato RAW

Nelle Webcam a colori, sopra al CCD, di per se stesso in BN, è depositato un film contenete filtri RGB. La disposizione di questi microscopici filtri è fatta secondo uno schema preciso, schema di bayer.

Fig 4

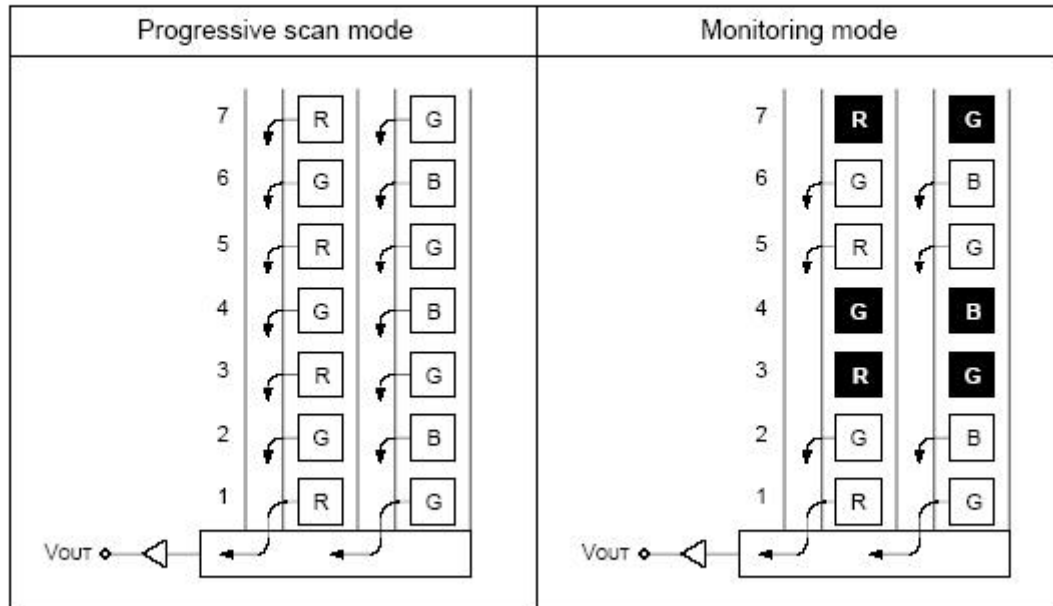


Gr e Gb sono segnali di "verde" della stessa linea, come rispettivamente R e G
 I segnali in uscita sono R Gr R Gr → Gb B Gb B

Nel modo di trasferimento progressivo e realtime mode abbiamo (per il ICX098AK):

Readout modes

The diagram below shows the output methods for the following two readout modes.



Note) Blacked out portions in the diagram indicate pixels which are not read out.

Il modo Progressive scan Mode abbiamo il trasferimento di tutta la matrice dell'immagine in circa 1/30 secondo. Subito si nota che nel trasferimento veloce abbiamo una riduzione della qualità dell'immagine anche se siamo in grado di avere 1/60 di secondo di aggiornamento. Il fattore è di 200 righe verticali contro le quattrocento precedenti. Nel caso delle Webcam, e delle macchine fotografiche in genere, i dati di luminanza generati dal CCD, dopo la conversione in binario, vengono elaborati generando tre canali (R,G,B) a 8 bit ciascuno. Questo è possibile proprio in dipendenza dello schema di bayer.

Sapendo che il primo pixel è ad esempio un rosso, sarà gestito dal canale del rosso ecc. La risoluzione non è ovviamente quella dichiarata ma circa 1/3.

I buchi tra un pixel di colore e l'altro sono riempiti tramite tecniche di interpolazione pesata e compressione per stare in 8 x 8 x 8 bit (16 milioni di colori, fasulli)

Come migliorare il sistema ?. Non elaborando i dati all'interno della WEBCAM.



L'evoluzione della fotografia stellare dalla pellicola al CCD

Abbiamo allora in uscita un segnale pseudo BN che ha una ampiezza non di 8 bit ma di 10 bit. L'elaborazione è possibile allora in ambito locale, dal PC collegato, senza compressioni dei dati, utilizzando ogni pixel con una profondità di 10 bit (nella toUcam).

Abbiamo allora una immagine a colori ad alta dinamica, adatta per le immagini astronomiche. La pseudo immagine così generata (cioè BN con filtro di bayer) è chiamata formato RAW. Molti programmi commerciali, come IRIS, sono in grado di gestire questa tecnica..