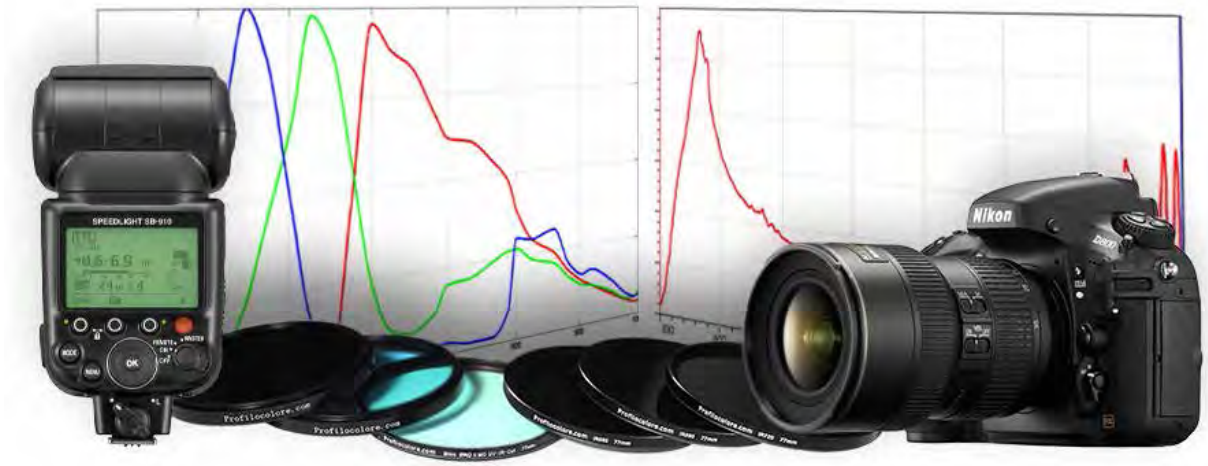
Nikon EXPERIENCE

www.nital.it

DICEMBRE **2013**

Variante Full Range su fotocamere Nikon: hardware e software fanno sistema e misurano la riflettanza spettrale



Le fotocamere hanno potenzialità inaspettate e, se integrate con adeguato software, diventano strumenti capaci di competere con sistemi di gran lunga più costosi. Con modifica Full Range di Profilocolore, possono “vedere” dagli ultravioletti agli infrarossi per estendere il potenziale in diversi campi d’applicazione: dall’Arte alla Medicina, dall’Investigazione al monitoraggio dell’Ambiente.

A cura di: MARCELLO MELIS, MATTEO MICCOLI e DONATO QUARTA

SOMMARIO

Introduzione

Sensibilità di una fotocamera standard

Modifica di una fotocamera Full Range

Indici di rifrazione e percorsi ottici nella fotocamera

Sistema di illuminazione ed esposizione in Full Range

Specializzazione della fotocamera Full Range:
i filtri ottici per banda di interesse

Full Range: da sensore a sistema

Conclusioni

Link correlati

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.

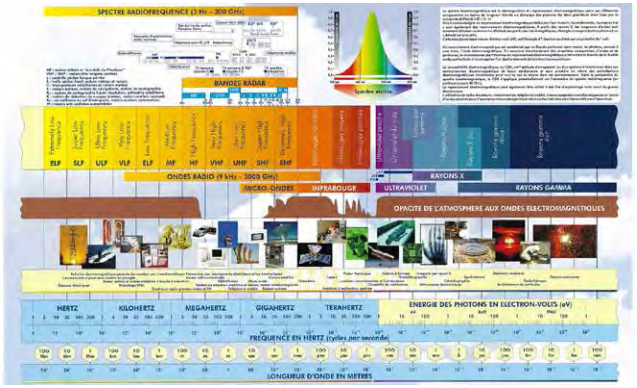
Comitato di redazione
Giuseppe Maio, Marco Rovere

Progettazione e impaginazione
Advision srl Verona. | www.ad-vision.it

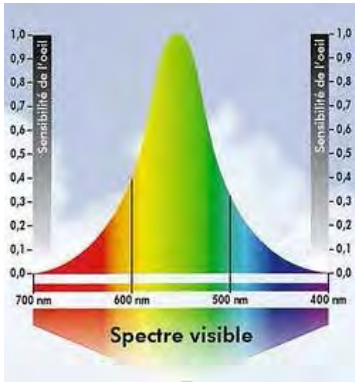
Introduzione

Il termine "fotografia", composizione di foto- (dal greco φῶς, -φωτός, luce) e -grafia (dal greco γραφία, disegno), implica intrinsecamente la registrazione su un supporto qualsiasi di quanto vediamo ad occhio nudo, cioè di quanto vediamo con la "luce" e con i nostri occhi. Possiamo anche dire che la fotografia è il risultato di un gioco a tre dove i partecipanti sono una sorgente di luce, un soggetto ed un sistema di cattura dell'immagine.
Ma la luce altro non è che un insieme di onde elettromagnetiche le cui lunghezze d'onda cadono in un intervallo ben preciso che noi chiamiamo, appunto, luce visibile. Appena usciamo da questo intervallo di onde elettromagnetiche visibili (comprese tra il blu ed il rosso come nell'arcobaleno) tutti i termini che includono la parola "foto" decadono e si passa a termini che includono la parola "radio".
Ad esempio un fotometro è uno strumento per misurare l'intensità della luce visibile, mentre un radiometro è uno strumento per misurare l'intensità di una radiazione in un intervallo di lunghezze d'onda qualsiasi. Uno spettrofotometro restituisce l'analisi di una radiazione elettromagnetica fornendo l'energia trasportata per ogni lunghezza d'onda tra quelle appartenenti alla luce visibile, mentre uno spettroradiometro è uno strumento che restituisce un grafico delle energie di una radiazione in una zona qualsiasi dello spettro elettromagnetico (inclusa la zona visibile).

Figura 1 Spettro elettromagnetico e spettro visibile



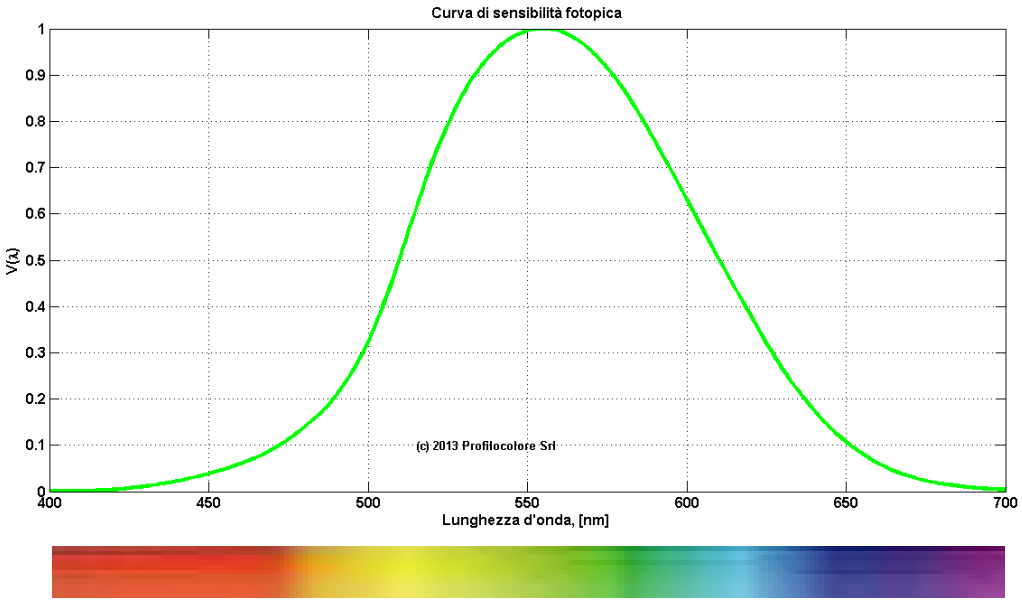
Spettro elettromagnetico completo
Fonte: Laboratorio di misure Emitech



Spettro visibile e sensibilità dell'occhio

Le misure radiometriche sono dirette, nel senso che vengono misurate grandezze fisiche (energia, potenza, etc.), invece nelle misure fotometriche le stesse grandezze (energia, potenza etc.) vengono prima pesate con la curva di sensibilità dell'occhio, la così detta curva di sensibilità fotopica, che scende a valore nullo per le lunghezze d'onda al di fuori della luce visibile. Le misure fotometriche vengono utilizzare per rappresentare fenomeni legati alla luce così come vengono percepiti dall'occhio, che non ha un comportamento lineare.

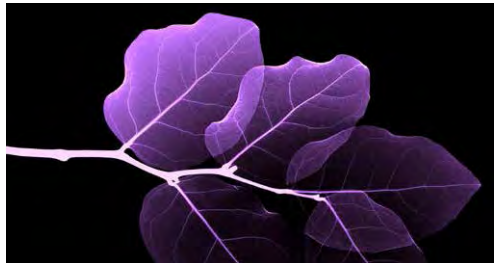
Figura 2 curva di sensibilità dell'occhio in ambiente ben illuminato



Allora possiamo considerare la fotografia come una specializzazione in luce visibile di un campo applicativo molto più vasto, dove i tre partecipanti al gioco sono una sorgente di onde elettromagnetiche di qualsiasi lunghezza d'onda, un soggetto con il quale queste onde abbiano una interazione (alcune materie infatti sono trasparenti, cioè non interagiscono, con certe lunghezze d'onda), ed un sistema che registri il risultato della interazione di questa energia con il soggetto. Pensiamo ad esempio ad una radiografia: questa non è altro che una fotografia eseguita per trasparenza invece che per riflessione, e con onde elettromagnetiche nella banda dei raggi-X invece che della luce visibile. Il principio è esattamente lo stesso con il quale si farebbe ad esempio una fotografia in luce visibile alla vetrata di una chiesa, vista in trasparenza.

Figura 3 trasparenze in luce visibile e raggi X

Fotografia in trasparenza con luce visibile
Vetrata, Daniela Zambolin



Radiografia di foglie in trasparenza con raggi X

Ma a cosa serve avere di uno stesso soggetto immagini provenienti da lunghezze d'onda diverse?

Serve ad avere una maggiore conoscenza della materia di cui è formato quel soggetto. Prendiamo ad esempio un dipinto. La luce visibile riflessa trasporta fino ai nostri occhi, o ad un sistema di ripresa fotografico, una informazione che tecnicamente si chiama immagine di riflettanza spettrale, e che noi comunemente chiamiamo fotografia a colori. Cioè la luce che incide sul dipinto, rimbalzando sulla superficie subisce una modificazione nelle sue componenti spettrali, e quando arriva al nostro occhio ci farà percepire punto per punto il colore e la luminosità del dipinto stesso, ovvero la luce che illumina il dipinto ci permetterà di vederne la superficie.

Se invece "illuminiamo" in trasparenza il dipinto con una sorgente di raggi X, ed utilizziamo un sistema che rilevi una immagine a quelle lunghezze d'onda (una lastra radiografica ad esempio), allora otterremo una così detta radiografia che conterrà come informazione, punto per punto, la densità totale che i raggi X hanno dovuto attraversare prima di emergere dall'altra parte, ovvero, grossolanamente, lo spessore puntuale del dipinto.

Figura 4 Stesso soggetto in luce (per riflessione) ed ai raggi X (per trasmissione)

Immagine in luce visibile riflessa
(Sulla spiaggia – Ausonio Tanda – Collezione Marcello Melis)

Immagine in raggi X trasmessi

La tecnologia ci consente oggi di avere sensori digitali praticamente per qualsiasi lunghezza d'onda. Siamo quindi nella condizione di poter ottenere, qualunque sia la lunghezza d'onda utilizzata, una immagine digitale, cioè una immagine nella quale ad ogni punto (pixel) viene associato un valore numerico proporzionale alla riflettanza o alla trasmittanza del soggetto. La rappresentazione numerica è una gran cosa e ci permette, rispetto alla precedente rappresentazione analogica, di calibrare il sistema di ripresa e fare in modo che una immagine sia, in ultima analisi, una misura punto per punto della scena ripresa.

Per concludere questa breve introduzione diciamo quindi che se potessimo guardare il mondo attraverso dei super-occhi in grado di "vedere" lunghezze d'onda in una banda molto più grande di quella visibile, vedremmo la realtà intorno a noi con una quantità di informazioni sulla materia molto più ricca.

Vedremo in questo eXperience come una fotocamera modificata Full Range, corredata di opportuno software e filtri ottici, ci permette in realtà di ottenere proprio questo in una gamma di lunghezze d'onda dagli ultravioletti agli infrarossi.

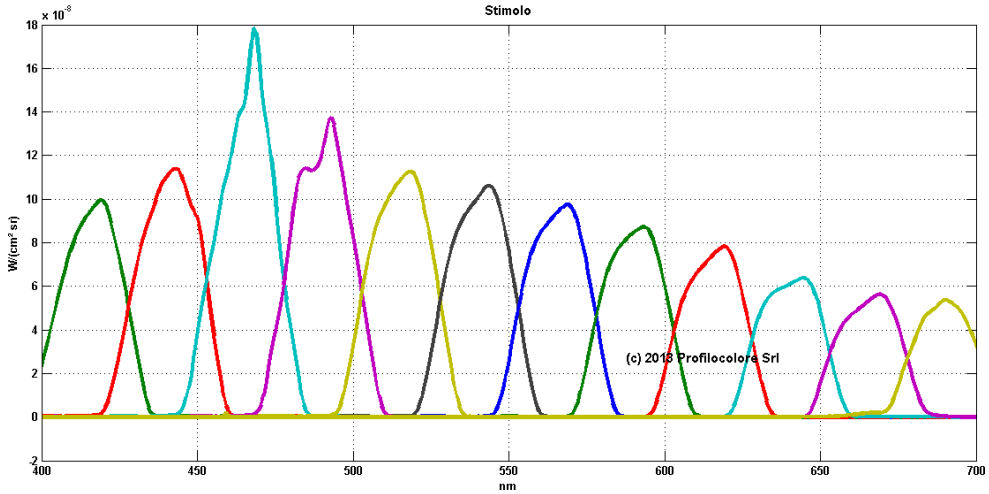
Sensibilità di una fotocamera standard

Ogni casa costruttrice di fotocamere ha come primo obiettivo quello di produrre un sistema in grado di restituire una immagine della scena ripresa, la più fedele possibile, ovvero con colori e luminosità corrispondenti il più possibile a quelli reali.

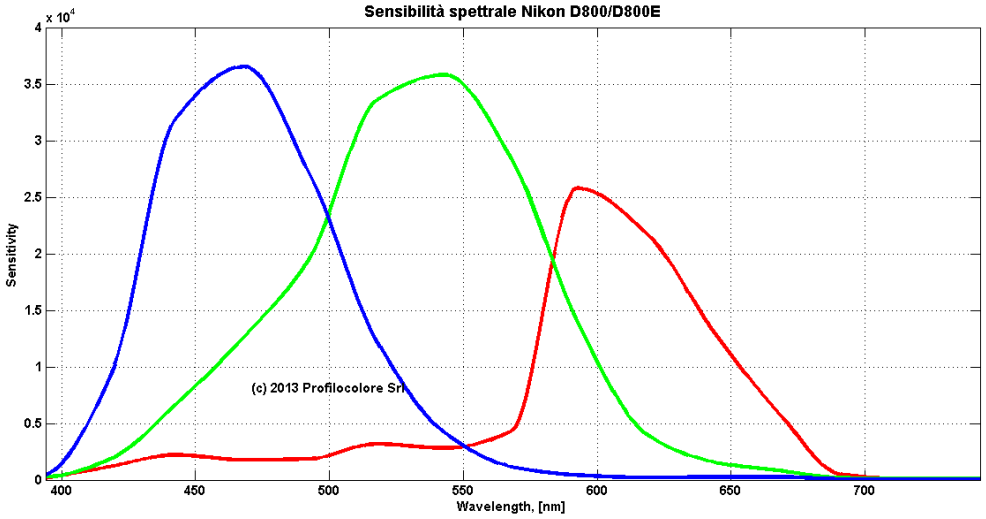
Per ottenere questo è necessario che una fotocamera si comporti in modo simile possibile all'occhio. In realtà oggi molte fotocamere non solo si comportano in modo simile all'occhio, dal punto di vista colorimetrico, ma spesso mostrano capacità di discernimento dei colori anche superiori come documentato nell'eXperience "Sensibilità allo spettro dei sensori Nikon FX e DX: sulla via del colore".

Il modo più completo per conoscere le caratteristiche cromatiche di una fotocamera è quello di sottoporla ad una misura di sensibilità spettrale. Questa consiste nell'illuminare il sensore con una sorgente a banda stretta con lunghezza d'onda centrale variabile nell'arco di tutta la banda visibile. Ad ogni incremento della lunghezza d'onda centrale si misura contemporaneamente l'energia fornita alla fotocamera ed il valor medio dei pixel dei tre canali, rosso, verde e blu, della matrice di Bayer. Il rapporto tra energia fornita e risposta numerica della fotocamera rappresenta la sensibilità della fotocamera in quel canale a quelle lunghezza d'onda. Raccordando tutti i punti con una opportuna funzione di interpolazione si ottengono le curve di sensibilità spettrale dei tre canali, rosso verde e blu.

Figura 5: Misura della sensibilità spettrale di una fotocamera



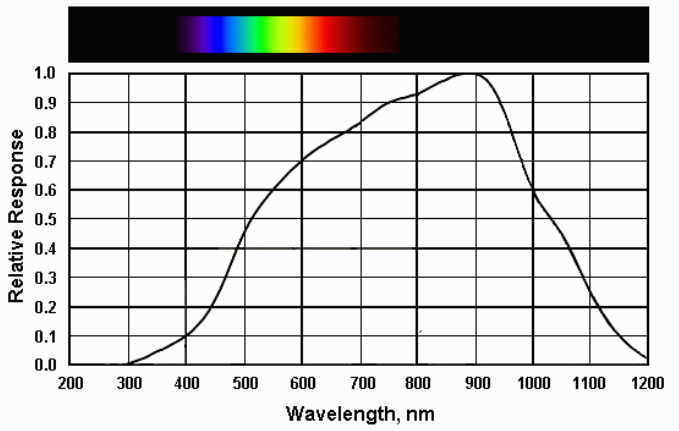
Stimolo luminoso con sorgenti a banda stretta



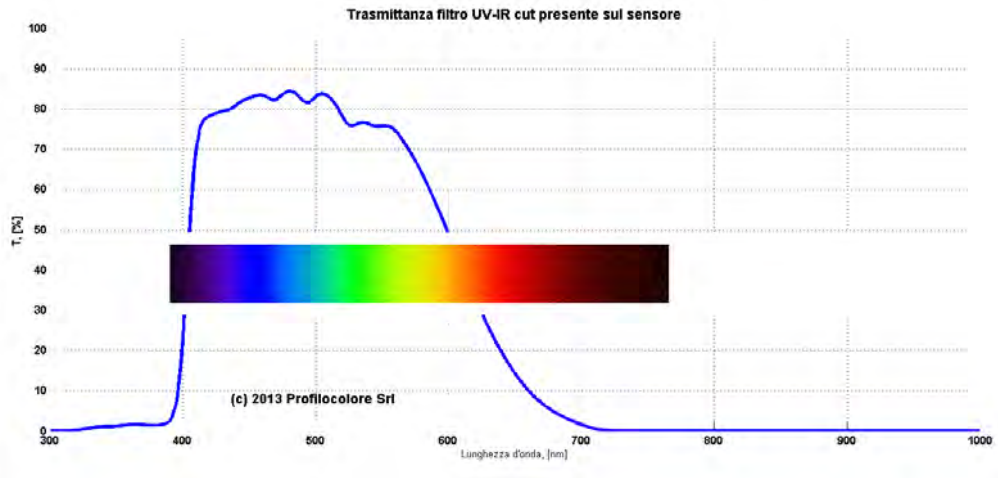
Sensibilità spettrale dei tre canali R, G, B di una D800/D800E

I sensori delle fotocamere per fotografia in luce visibile sono costruiti a partire da silicio semiconduttore con tecnologia simile a quella utilizzata per la fabbricazione dei circuiti integrati e dei microprocessori. Tutti i sensori al silicio presentano una sensibilità spettrale nativa che va da circa 300 a circa 1.200 nanometri. I costruttori di fotocamere, per limitare il funzionamento di questi sensori alla banda visibile pongono davanti al sensore uno o più filtri che nel loro complesso riducono a zero la sensibilità a tutte quelle lunghezze d'onda non desiderate.

Figura 6: Sensibilità dei sensori al silicio e filtro per farli lavorare solo nel visibile



Sensibilità spettrale nativa dei sensori al silicio



Trasmittanza spettrale di un tipico filtro UV-IRcut che limita la sensibilità della fotocamera alla banda visibile

Modifica di una fotocamera Full Range

Abbiamo visto dunque quale è la sensibilità spettrale di un sensore al silicio, quale è la trasmittanza spettrale del filtro che ne limita la sensibilità alla sola banda visibile ed infine la sensibilità spettrale dei tre canali RGB di una fotocamera standard. Vedremo ora cosa va fatto per modificare una fotocamera e quale è l'effetto della matrice di Bayer, cioè della specializzazione dei pixel del sensore nei colori rosso, verde e blu, al di fuori dello spettro visibile.

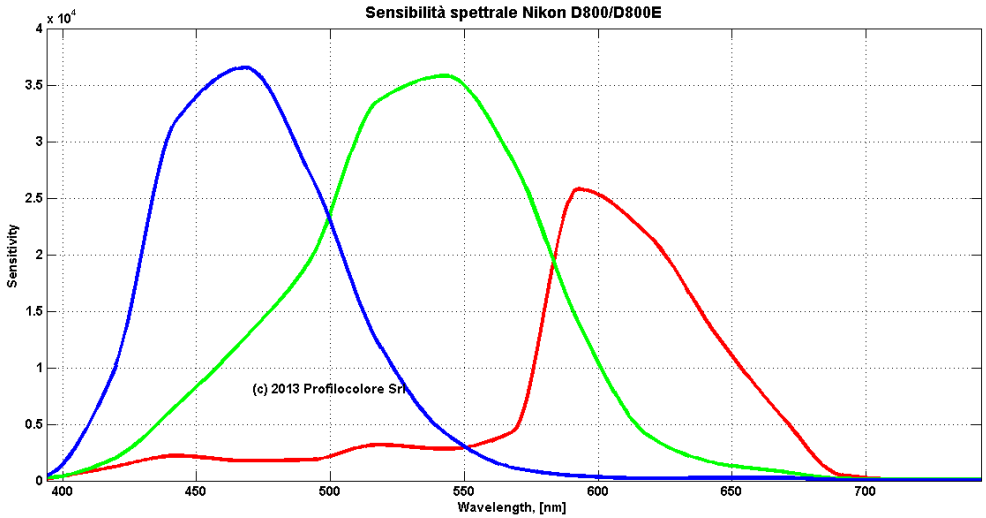
È sufficiente rimuovere il filtro UV-IR cut per ripristinare la piena sensibilità del sensore al silicio? Cosa succede alla sensibilità spettrale? Cosa succede all'intero sistema ottico? Potremo usare gli stessi obiettivi di prima? Funzionerà ancora l'autofocus? Come cambia la qualità dell'immagine? E cosa succede al rumore del sensore? Come faremo a calcolare l'esposizione? Quali "colori" vedremo, ad esempio, in live view e che senso avranno? Cosa dovremo utilizzare per illuminare la scena da fotografare in una banda così larga? Potremo continuare a riprendere anche fotografie "normali"? Quali filtri dovremo utilizzare? Daremo una risposta a tutte queste domande nei prossimi paragrafi.

Nikon D800

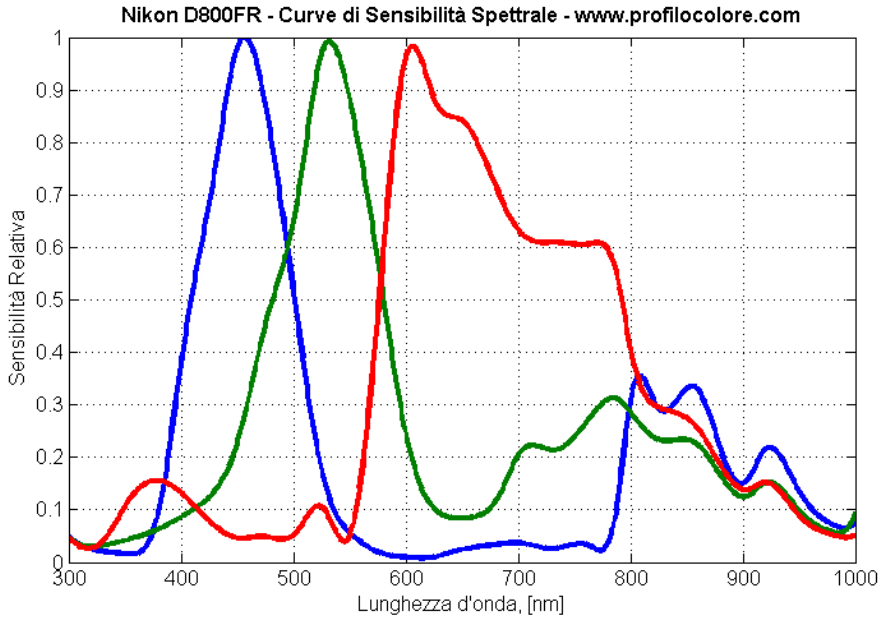
Sensibilità spettrale Full Range

La risposta la troviamo solo eseguendo nuovamente una misura della sensibilità spettrale della fotocamera, ma questa volta dopo aver rimosso il filtro UV-IR cut. I grafici che ne risultano, per i canali rosso verde e blu, sono piuttosto interessanti perché hanno un andamento imprevisto, ed imprevedibile. La fotocamera che abbiamo analizzato è la D800FR, cioè una Nikon D800 modificata in Full Range.

Figura 7: Sensibilità spettrali della D800 standard (E) e Full Range (FR)



Sensibilità spettrale di una D800/D800E



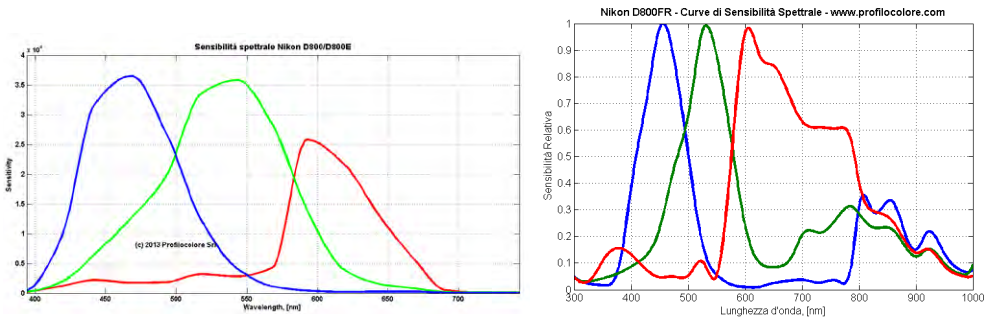
Sensibilità spettrale di una D800/D800E modificata in Full Range (D800FR)

Innanzi tutto, rimanendo nella zona del visibile si vede come il canale rosso presenta una sensibilità superiore a quella mostrata nella fotocamera standard. Questo si giustifica con la grande sensibilità del silicio proprio in questa banda, e rende anche ragione della forma (e colore) del filtro UV-IR cut che presenta una attenuazione maggiore nel rosso rispetto al verde ed al blu.

La seconda considerazione va fatta per il canale rosso che sorprendentemente diventa più trasparente (attenua di meno) del canale verde nella banda degli UV, cioè dai 300 ai 400 nanometri, ed inoltre si incrocia come sensibilità con il canale blu, diventando più sensibile proprio alle lunghezze d'onda più corte.

Ultima considerazione riguarda la banda degli infrarossi, che possiamo dividere in tre zone: 700-800, 800-900 e 900-1.000 nanometri. Nella prima (che chiameremo da ora in poi IR1) la sensibilità del canale rosso è costante e continua ad essere significativa, mentre blu e verde presentano una sensibilità bassa, anche se crescente; nella seconda zona (IR2) le tre curve si riuniscono presentano sensibilità pressoché uguale. Anche nella terza (IR3) le tre sensibilità corrono affiancate con piccole differenze, ma ormai vanno riducendosi, seguendo la naturale diminuzione di sensibilità del silicio.

È chiaro quindi come la presenza della matrice di Bayer abbia una influenza non trascurabile sulla sensibilità spettrale di una fotocamera modificata Full Range. Ma contrariamente a quanto verrebbe di pensare, questo fatto si rivelerà un enorme vantaggio nello sfruttamento della fotocamera come sensore per applicazioni multispettrali.

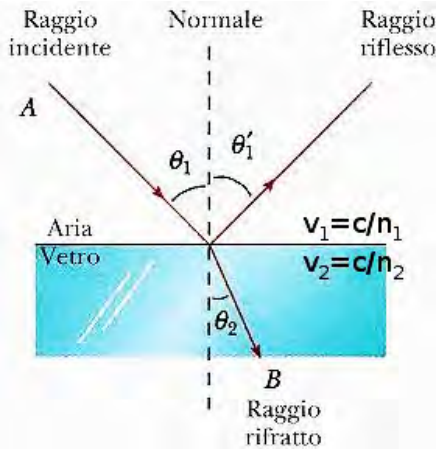


Sensibilità spettrale: a sinistra Nikon D800 di serie a destra modificata in Full Range

Indici di rifrazione e percorsi ottici nella fotocamera

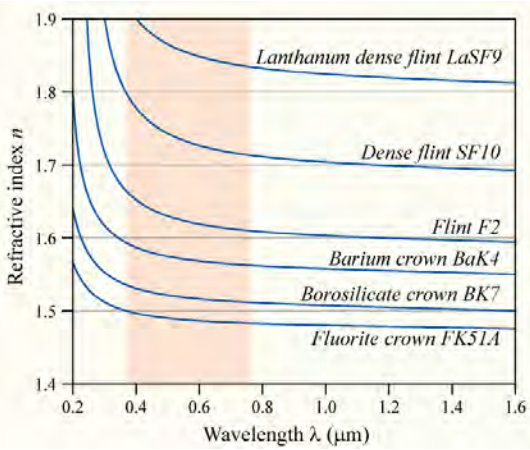
Tutta l'ottica presente sia nella fotocamera che, in modo massivo, negli obiettivi si basa sul fenomeno della rifrazione, ovvero sul fatto che la luce, passando da un mezzo ad una certa densità ad un altro con densità diversa (ad esempio aria/vetro) subisce una deviazione rispetto al percorso rettilineo, proporzionale al rapporto tra le densità dei due mezzi (o al rapporto tra i così detti indici di rifrazione dei due mezzi), ed all'angolo di incidenza con cui la luce colpisce la superficie di interfaccia. Il fenomeno è regolato da quella che va sotto il nome di Legge di Snell: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ dove n indica l'indice di rifrazione.

Figura 8: Rifrazione di un'onda elettromagnetica nel passaggio da un mezzo ad un altro



Fenomeno della rifrazione: interfaccia piana

- Simulatore -



Indici di rifrazione dei vari materiali al variare della lunghezza d'onda

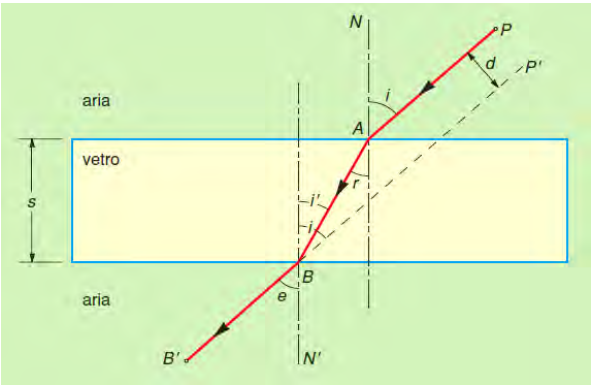
Il fenomeno della rifrazione ha una ripercussione importante quando la luce attraversa una lastra di vetro (optical window) perché il suo cammino non subisce una deviazione angolare ma uno spostamento parallelo.

La rimozione del filtro UV-IR cut sottrae al cammino ottico una componente importante che va ripristinata e che dipenderà da diversi fattori, non solo quelli della finestra ottica originale perché dovendo considerare ora una banda più larga si dovrà avere l'accorgimento di ripristinare il cammino ottico critico corrispondente alla messa a fuoco all'infinito nella massima lunghezza d'onda che attraverserà la lastra. La finestra ottica da impiantare al posto del filtro originale avrà quindi uno spessore che dipenderà da:

- nuovo indice di rifrazione rispetto a quello del filtro tolto
- lunghezza d'onda massima che deve attraversare la finestra ottica
- geometria dell'obiettivo a focale più corta che si vuole usare (determina gli angoli di incidenza sulla finestra ottica)
- tiraggio del corpo macchina

Tutti questi parametri vanno inseriti in una equazione trascendentale di non semplice soluzione. Una errata soluzione, può portare ad una modifica che impedisce la messa a fuoco all'infinito in certe situazioni, oppure al contrario ad una finestra ottica inefficiente o addirittura impossibile per gli ingombri richiesti.

Figura 9: Spostamento per rifrazione dato da lastra piana a facce parallele



Spostamento di un raggio rifratto da lastra

angolo di ingresso i = angolo di uscita e

i = e

d =s*[(n-1)/n]*irad

s = spessore della lastra

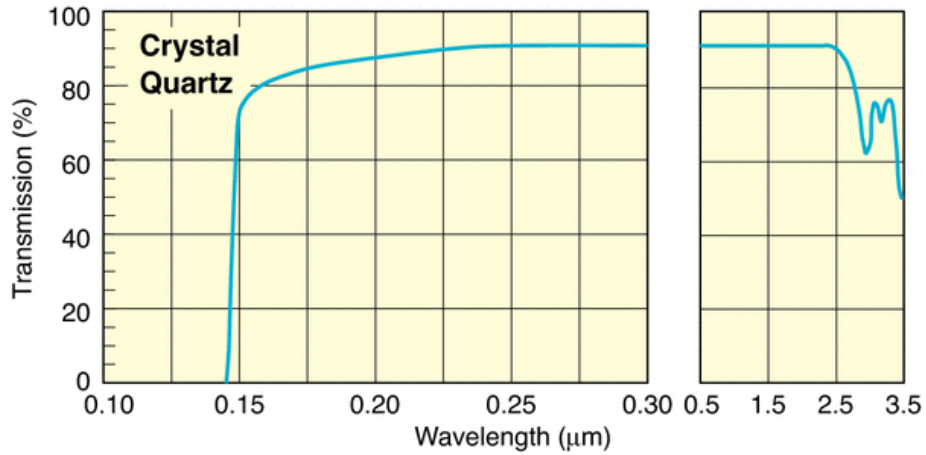
d = spostamento del raggio

n = indice di rifrazione relativo

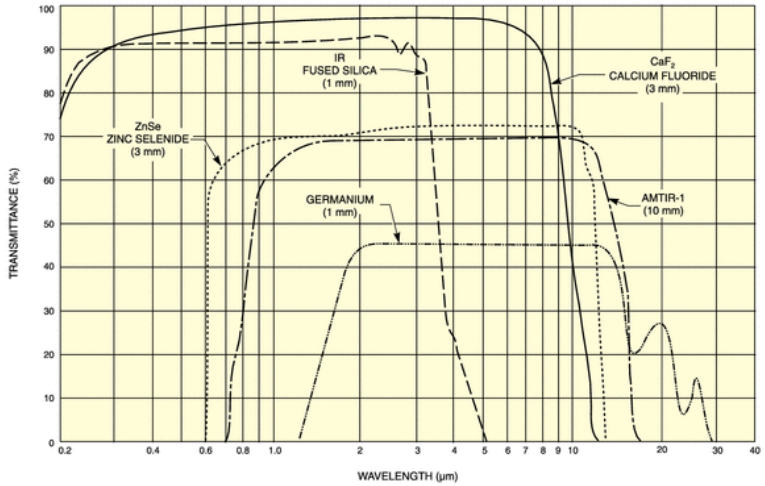
Calcolo spostamento del raggio

Una cosa ovvia, ma che va assolutamente sottolineata, è che la finestra ottica in sostituzione del filtro originale deve avere una trasparenza (trasmittanza spettrale) massima su tutta la banda di sensibilità del sensore. E necessario quindi scegliere opportunamente il materiale con sui viene realizzata per evitare di fare una modifica praticamente inutile. Un materiale ideale è il cristallo di quarzo, che presenta una straordinaria trasparenza a tutte le lunghezze, ma non è il solo che può essere utilizzato.

Figura 10: Trasmittanze di vari materiali per finestre ottiche



Trasmittanza del cristallo di quarzo



Trasmittanze di altri materiali

L'ultima considerazione che va fatta sulla finestra ottica con cui si sostituisce il filtro (o i filtri) originale riguarda le proprietà ottiche, cioè la qualità di fabbricazione. Soprattutto su una fotocamera come la Nikon D800/D800E dove i 36 milioni di pixel sono capaci di catturare qualsiasi infinitesimo dettaglio, non è pensabile utilizzare una finestra ottica qualsiasi o di bassa qualità.

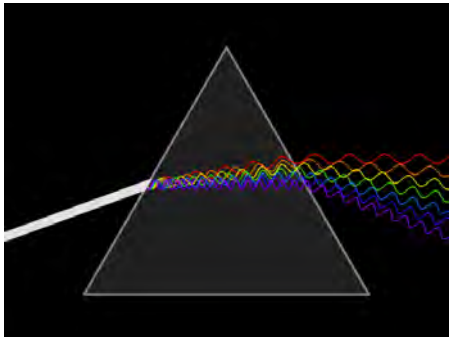
Ci riferiamo ad almeno un paio di aspetti geometrici: il parallelismo tra le due facce della finestra e la levigatura. Entrambi devono essere ai massimi livelli. Ad esempio la politura delle superfici deve garantire asperità inferiori a lambda/4, dove lambda indica la lunghezza d'onda elettromagnetica che attraverserà la finestra (la luce, per intenderci). Considerando che la sensibilità arriva fino a 300 nanometri, le asperità della superficie non devono superare i 75 nanometri (1 nanometro = 1 miliardesimo di metro = 1 milionesimo di millimetro).

Qua abbiamo citato solo un paio di parametri che caratterizzano la qualità ottica di un qualunque dispositivo semplice. Una panoramica più ampia ed esaustiva può essere consultata sul sito della Edmund Optics.

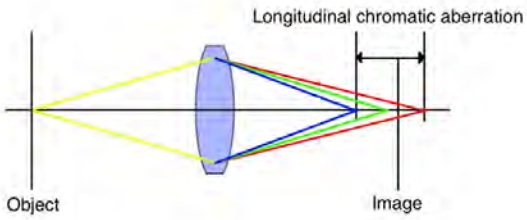
Dispersione

L'angolo di cui devia un'onda elettromagnetica (inclusa la luce) per rifrazione dipende anche dalla lunghezza d'onda stessa: maggiore è la lunghezza d'onda minore è la deviazione. Questo fenomeno, che viene chiamato dispersione, è responsabile della formazione dell'arcobaleno, ad esempio. Ma il fenomeno si presenta anche nel passaggio della luce in una lente semplice, creando la così detta aberrazione cromatica, ovvero l'impossibilità di trovare un unico piano di messa a fuoco dove convergano tutte le componenti cromatiche.

Figura 11: Fenomeno della dispersione ed aberrazione cromatica



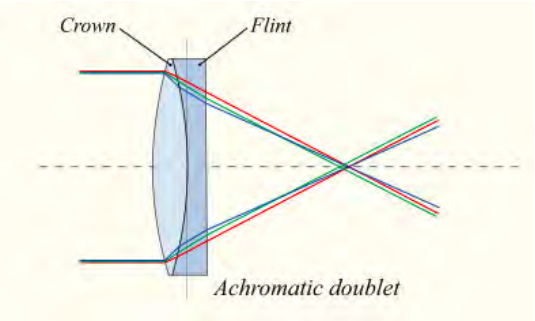
Dispersione della luce nel prisma



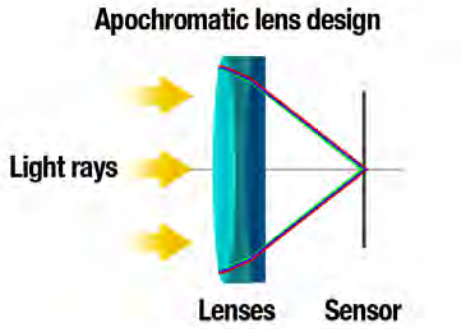
Aberrazione cromatica in una lente

Negli obiettivi questo fenomeno di dispersione viene contrastato da particolari combinazioni ottiche costituite da due lenti di forma e materiale diversi, dette doppietti acromatici. La sigla ED, ad esempio, rilevabile su obiettivi Nikkor di Nikon è l'acronimo per Extremely low Dispersion, ovvero dispersione cromatica estremamente bassa.

Figura 12: Correzione della dispersione cromatica negli obiettivi



Correzione acromatica (doppietto acromatico)



Correzione apocromatica

Comportamento degli obiettivi alla dispersione nel Full Range

Dunque gli obiettivi per fotocamere contengono, tra vari altri, alcuni accorgimenti per ridurre il fenomeno della dispersione. Cioè sono ottimizzati per presentare la minima aberrazione cromatica nella banda del visibile. Ma cosa succede se la banda elettromagnetica interessata diventa molto più grande, dai 300 ai 1.000 nanometri come nella variante Full Range? Bene, succede che con il variare della lunghezza d'onda (ultravioletto, visibile, infrarosso) sarà necessario modificare la messa a fuoco, ed inoltre che l'uso della fotocamera senza alcun filtro sull'obiettivo che limiti la banda di lavoro, produrrà delle immagini che presenteranno sempre un po' di "morbidezza" perché i contribuiti alle varie lunghezze d'onda non potranno essere tutti a fuoco contemporaneamente.

Anche nel caso di una banda così larga è possibile approntare accorgimenti che limitino la dispersione. Questo viene fatto, ad esempio, sulle sonde di radianza di spettroradiometri a banda larga, come quello che utilizziamo nel nostro laboratorio, ma il costo di tali ottiche diventerebbe assolutamente proibitivo per un uso anche professionale, ed in più non sarebbe possibile raggiungere quelle luminosità cui gli obiettivi professionali ci hanno abituato.

Rivestimenti antiriflesso

Qua va fatta una ulteriore considerazione che riguarda i rivestimenti antiriflesso di cui alcune lenti degli obiettivi sono dotate. L'utilizzo del "coating", come tecnicamente in modo anglofono viene chiamato il rivestimenti antiriflesso, ha fondamentalmente due scopi: ridurre fastidiosi riflessi tra lente e lente, e tra lente e sensore, ed aumentare la trasparenza complessiva dell'obiettivo, e quindi la sua luminosità. Cioè l'antiriflesso riduce drasticamente la quantità di luce che raggiungendo la superficie rimbalzerebbe altrove, "convogliandone" all'interno la massima parte. Purtroppo più è larga la banda di lunghezze d'onda di cui si vuole limitare il riflesso, più complessi sono lo studio e la deposizione del film sottile che ricopre le lenti, e la caratteristica dell'antiriflesso è quella di manifestare un comportamento esattamente opposto appena si va oltre la banda per la quale è stato studiato.

Detto in altre parole, se un obiettivo presenta una ottima caratteristica di antiriflesso nel visibile, è probabile che presenti più riflessi del dovuto nella bande adiacenti, cioè gli ultravioletti e gli infrarossi. Nella scelta degli obiettivi per operare in Full Range questo ha una notevole importanza, e non ha nulla a che fare con la bontà degli obiettivi, anzi può succedere che obiettivi ottimi nel visibile non lo siano altrettanto nel Full Range.

Fino ad oggi l'obiettivo che a noi non ha mai dato un solo problema è l'AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED, che si comporta egregiamente a tutte le lunghezze d'onda senza mai produrre alcun alone o riflesso spurio, nonostante le sue 14 lenti ripartite in 12 gruppi.

Diversamente l'AF-S Nikkor 24-70mm f/2.8G ED, quando usato a focali corte, presenta nella seconda banda infrarossi (IR2) una luminosità centrale non equilibrata con il resto della inquadratura, alterando di fatto l'uniformità di esposizione, anche se di poco.

Sistema autofocus

Nelle fotocamere reflex dotate di Live View i sistemi di messa a fuoco sono due: uno tradizionale basato su prismi, come quello a linea spezzata presente nelle vecchie fotocamere, ed uno basato sul microcontrasto dell'immagine che si forma sul sensore quando è in funzione il Live View.

Il secondo sistema è praticamente infallibile ed indipendente dalla lunghezza d'onda alla quale si sta riprendendo, perché agisce sulla messa a fuoco dell'obiettivo fino a quando l'immagine diventa a fuoco proprio sul piano di ripresa, quello del sensore. L'unico limite è che ha bisogno di una sufficiente luminosità per essere efficiente. Il primo invece, non analizza l'immagine sul piano del sensore e quindi richiede una taratura su di un piano a distanza equivalente (un po' come la messa a fuoco a mano sul vetrino di messa a fuoco che vediamo nell'oculare). Ma questo sistema prevede che il cammino ottico sia sempre lo stesso, cosa che invece non è vera per la variante Full Range in quanto con l'ampia variabilità della lunghezza d'onda il cammino ottico può cambiare anche significativamente (vedi Figura 9). Nel Full Range convenzionalmente quindi il sistema AF viene ritarato, dopo la modifica ottica, per funzionare correttamente nel visibile, come per la fotocamera standard non modificata. In questo modo, utilizzando un opportuno filtro davanti all'obiettivo (di cui parleremo più avanti) la fotocamera recupera integralmente tutte le sue funzioni, come se non fosse stata mai modificata.

Nitidezza dell'immagine

La nitidezza dell'immagine dipende principalmente da due fattori: livello di rumore e qualità dell'obiettivo. A sua volta il livello di rumore dipende, a parità di altri fattori, come tecnologia utilizzata e dimensione del pixel, che non possono essere modificate, dal livello di sensibilità impostato.

Di nuovo ci troviamo di fronte alla questione che tutti gli obiettivi vengono ottimizzati per le lunghezze d'onda del visibile e quindi quando ci si allontana da questa banda le prestazioni possono iniziare a ridursi. La nostra esperienza pratica ci fa dire che nonostante ci si allontani abbastanza dal visibile, soprattutto nella banda degli infrarossi, le prestazioni degli obiettivi rimangono sempre alte, cioè al livello analogo a quelle nella zona del visibile (a parte eventuali fenomeni di riflesso di abbiamo già parlato).

Rumore del sensore

Il rumore del sensore dipende da diversi fattori, tra cui la tecnologia utilizzata (c'è differenza ad esempio tra sensori CCD e sensori CMOS, dove questi ultimi sono meno rumorosi soprattutto alle basse luminosità), la dimensione dei pixel e la sensibilità utilizzata. Parametri fotografici sul tema di rumore in correlazione alla risoluzione sono reperibili sul sito DxOMark.

Non cambiando il primo ed il secondo fattore, intrinsecamente legati alla costruzione del sensore, rimane da valutare il terzo, il quale è a sua volta direttamente collegato alla sensibilità spettrale della fotocamera. Si può notare dal diagramma della sensibilità spettrale (Figura 7) che uscendo dalla zona della luce visibile le sensibilità dei tre canali di Bayer diminuiscono di un fattore fino a 10. Ma va fatta una considerazione: nella zona del visibile i tre canali di Bayer non possono essere miscelati per non perdere l'informazione cromatica, al di fuori del visibile, decadendo la funzione della matrice di Bayer, i segnali provenienti dai tre canali possono essere uniti per ottenere due vantaggi: un segnale più robusto ed una riduzione del rumore cromatico. Sommando i canali si vede come il segnale finale aldi fuori del visibile non scende mai al di sotto di 1/5 del segnale massimo nei tre canali RGB nel visibile. In termini fotografici vuol dire che la distanza tra il visibile e le bande esterne non raggiunge i 3EV, ed è facilmente colmabile esposimetricamente senza modificare gli ISO.

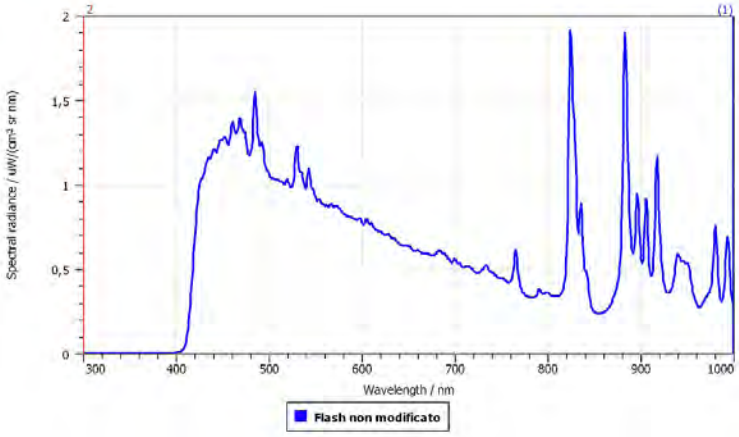
Sistema di illuminazione ed esposizione in Full Range

Se vogliamo lavorare con una fotocamera Full Range, per prima cosa dobbiamo procurarci una fonte di illuminazione in grado di fornire energia su uno spettro così ampio, con una distribuzione di energia abbastanza elevata ed omogenea dagli ultravioletti agli infrarossi. Una ottima soluzione è quella di utilizzare i flash Nikon SB-910, ma dopo avere rimosso il gruppo ottico anteriore costituito da due lenti di fresnel. Lo spettro di emissione risultante, come si vede dalla Figura 13, è davvero ottimo fornendo maggiore energia proprio dove la fotocamera FR ha meno sensibilità.

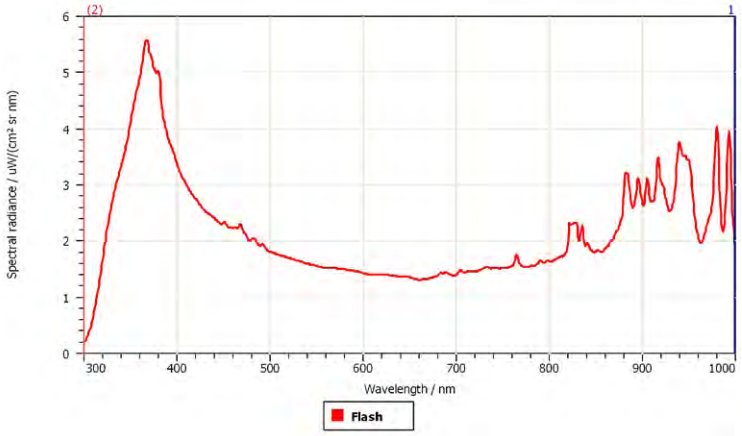
Non ci sono molte alternative a questo tipo di illuminazione. Una illuminazione mista, ad esempio alogena + lampada di wood, comporta immancabilmente spettri disuniformi nella illuminazione perché, a meno di posizionare le sorgenti così lontane da considerarle coincidenti, i due fasci di luce non avranno mai la stessa distribuzione, generando quindi zone con composizione spettrale diversa, utile solo a ricavare informazioni completamente sbagliate dalle immagini.

Figura 13: Flash Nikon SB-910FR (modificato per riprese ad ampio spettro)

Nikon SB-910 standard



Spettro di emissione SB-910 standard



Spettro di emissione SB-910FR

Nikon SB-910FR
(e gruppo ottico rimosso)

Per quanto riguarda l'esposizione, ovviamente l'esposimetro interno della fotocamera non potrà essere più di aiuto, se non quando si utilizza di nuovo la fotocamera nel visibile, ma rimane di fondamentale aiuto l'analisi dell'istogramma, soprattutto quello RGB. È infatti fondamentale che in nessuna banda e per nessuno dei tre canali RGB si verifichi mai una saturazione. Attenzione perché l'istogramma "bianco" è una media dei tre istogrammi RGB e potrebbe mascherare la saturazione di uno di questi canali. La Nikon D800 è dotata della utilissima funzione istogramma RGB selettivo per la zona ingrandita sullo schermino posteriore, che permette una analisi dettagliata dell'immagine.

Specializzazione della fotocamera Full Range: i filtri ottici per banda di interesse

Ora che abbiamo un sensore a banda larga ed un sistema di illuminazione adeguato, cosa possiamo farci?

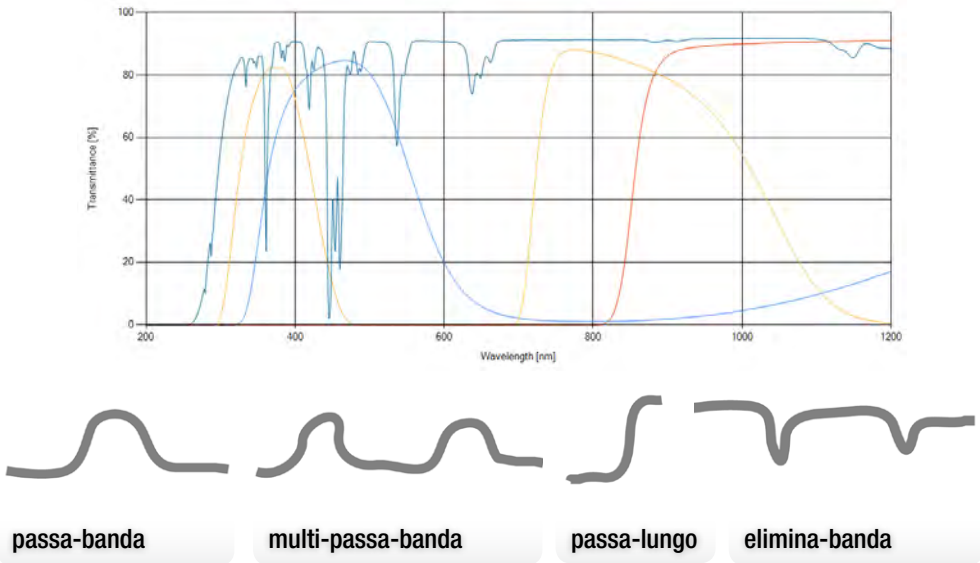
Distinguiamo subito un uso della fotocamera dove mettiamo insieme più scatti dello stesso soggetto fatti con filtri diversi, da quello con uno scatto singolo. Il primo modo è più complesso e comporta conoscenze ed attrezzatura di livello superiore, mentre il secondo è più immediato e non richiede particolari elaborazioni.

Singolo scatto e filtri ottici

Uno scatto singolo in genere viene fatto per esplorare una banda specifica, esterna al visibile (altrimenti non avremmo bisogno di una Full Range). La specializzazione della fotocamera in una banda può avvenire o per utilizzo di un filtro passa banda oppure utilizzando una illuminazione limitata alla nostra banda di interesse. Quest'ultimo modo pone forti limitazioni, non solo per la necessità di reperire una sorgente di illuminazione con la banda desiderata, ma anche perché richiede che quella sorgente sia l'unica presente, e quindi che si lavori praticamente in camera oscura. Inoltre ovviamente sarà impossibile fare fotografie in esterno con questo metodo.

I filtri possono essere passa-banda, cioè limitare la sensibilità della fotocamera da una lunghezza d'onda ad un'altra, multi-passa-banda, quando lasciano passare contemporaneamente lunghezze d'onda appartenenti a più zone dello spettro, passa-lungo quando lasciano passare da una certa lunghezza in su, ed elimina banda o bande, quando impediscono il passaggio di illuminazione in una o più bande contemporaneamente.

Figura 14: Tipologie di filtri ottici



Il grafico che caratterizza un filtro si chiama trasmittanza spettrale e racconta, al variare della lunghezza d'onda, la percentuale di energia che il filtro lascia passare. Se si uniscono due filtri, avvitandoli ad esempio uno sull'altro, si ottiene un filtro complessivo la cui trasmittanza è pari alle due originali moltiplicate tra di loro per ogni lunghezza d'onda. Se ad esempio a 650nm il primo filtro ha una trasmittanza del 60% ed il secondo del 40%, la loro combinazione avrà, a quella lunghezza d'onda, una trasmittanza del 24% (infatti 0,6 x 0,4 = 0,24).

Dunque anteponendo un filtro, o una combinazione di filtri davanti all'obiettivo, è possibile scattare una fotografia specializzata in una certa zona dello spettro. Il concetto di colore è legato alla luce visibile ed al funzionamento dell'occhio. Appena usciamo dalla luce visibile non si può più parlare di colore ma di quanta illuminazione viene riflessa dal nostro soggetto alle lunghezze d'onda del filtro. In altre parole dovremmo avere una fotografia monocromatica, un bianco e nero, dove l'intensità del bianco indica la quantità di energia riflessa.

In pratica, anche dotando la fotocamera di un filtro passa-banda a banda stretta, otteniamo sempre una fotografia colorata. Questo è dovuto al fatto che l'energia catturata contribuisce in modo diverso ai livelli dei tre canali della matrice di Bayer, e questi tre livelli vengono restituiti nel visore della fotocamera come se fossero i contributi rosso, verde e blu di una fotografia nel visibile. Se ad esempio otteniamo una immagine violacea, vuol dire che i canali rosso e blu raccolgono più energia (hanno maggiore sensibilità) del canale verde.

Full Range: da sensore a sistema

Lo scatto singolo, ovvero uno scatto in una specifica banda, viene utilizzo in vari campi, sia ludici che professionali. Ad esempio uno scatto negli infrarossi può essere combinato con o sostituito ad una banda nel visibile e dare luogo a fotografie artistiche. Ci sono siti specializzati, dove è possibile guardare fotografie fatte con queste tecniche, ma ci sono anche moltissime immagini non corrette. Ad esempio nel sito Lifepixel è possibile trovare varie combinazioni di immagini agli infrarossi e negli ultravioletti, ma attenzione! Molti sono trucchi, come spiegato nelle successive immagini, e non hanno nulla a che vedere con la vera fotografia agli UV ed IR.

Figura 15: False foto agli ultravioletti da Lifepixel

Falsa foto negli UV. Forse dagli UV è stata presa la parte di luminosità (L) ed applicata all'immagine nel visibile.

Falsa foto negli UV. La foto è fatta nel visibile con una normalissima fotocamera, la scena è illuminata da una luce ultravioletta che eccita la fluorescenza.

Nel visibile, nonostante facciamo un solo scatto, grazie alla matrice di Bayer, catturiamo la luce in tre bande separate, blu, verde e rosso, e questo ci permette di ottenere una fotografia i cui colori, attraverso alcuni accorgimenti di calibrazione (vedi eXperience "Sulla via del colore") ci appaiono molto simili se non uguali a quelli originali.

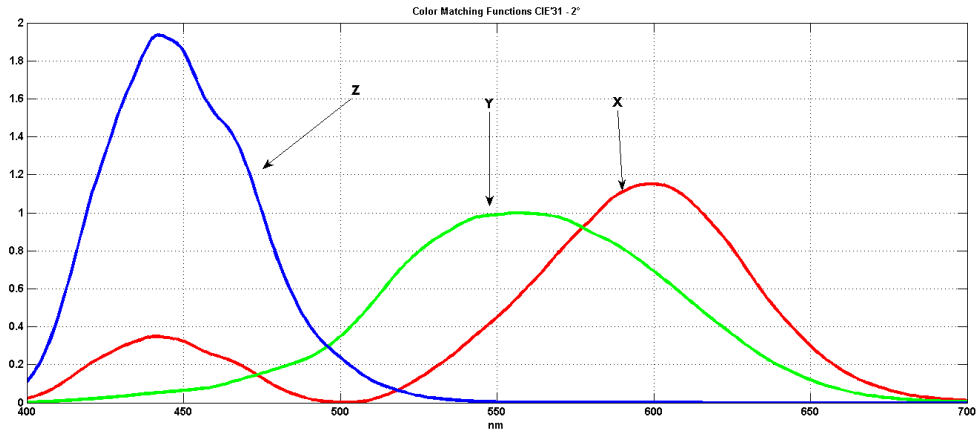
Nella banda del visibile possiamo parlare di colori ma possiamo anche riferirci alla riflettanza spettrale di una superficie, cioè a quella curva che ci dice per ogni lunghezza d'onda la quantità di luce riflessa dalla superficie. Dalla riflettanza spettrale, aggiungendo un illuminante, è possibile ricavare le tre coordinate colorimetriche XYZ ad essa associate, che sono legate alla fisiologia dell'occhio, cioè sono rappresentative del tipo di stimolo che l'occhio riceve quando esposto a quella superficie illuminata con quello stesso illuminante.

Pur non potendo parlare di colori, è possibile con una fotocamera Full Range pensare di registrare la riflettanza spettrale a larga banda di una superficie? La risposta non è scontata, ma dopo anni di messa a punto di tecniche ottiche e software oggi possiamo dare una risposta decisamente positiva, riuscendo a fornire di una scena la riflettanza spettrale, non continua ma campionata in 7 bande centrate a 350, 450, 550, 650, 750, 850 e 950 nanometri.

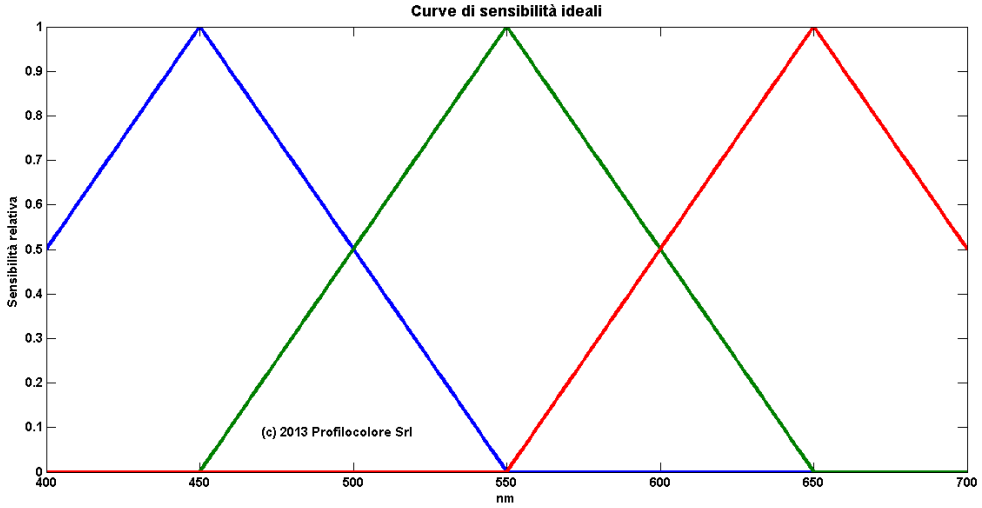
Per arrivare a questo è stato necessario estendere i concetti alla base della colorimetria standard (anche questa fornisce un campionamento in tre bande degli spettri continui nella banda visibile!), aggiungendo alcune considerazioni.

Gli spettri nella luce visibile vengono campionati dalla colorimetria attraverso le Color Matching Functions. Queste a loro volta derivano dalla fisiologia dell'occhio. Se al posto dell'occhio abbiamo un sensore elettronico, al posto delle Color Matching Functions possiamo utilizzare altre funzioni più efficienti nel campionare gli spettri, con forma più regolare e geometrica. Estendendo il concetto ad una banda più larga, e continuando a pensare di dividerla in bande di larghezza analoga a quelle del visibile, l'intervallo 300-1.000 nanometri possiamo immaginarlo diviso in 7 sotto bande. Le funzioni di campionamento diventano allora 7, hanno tutte la stessa forma, ed altezza (sono equienergia), si presentano come nella Figura 16 e le abbiamo chiamate Hypercolor Matching Functions (HMF).

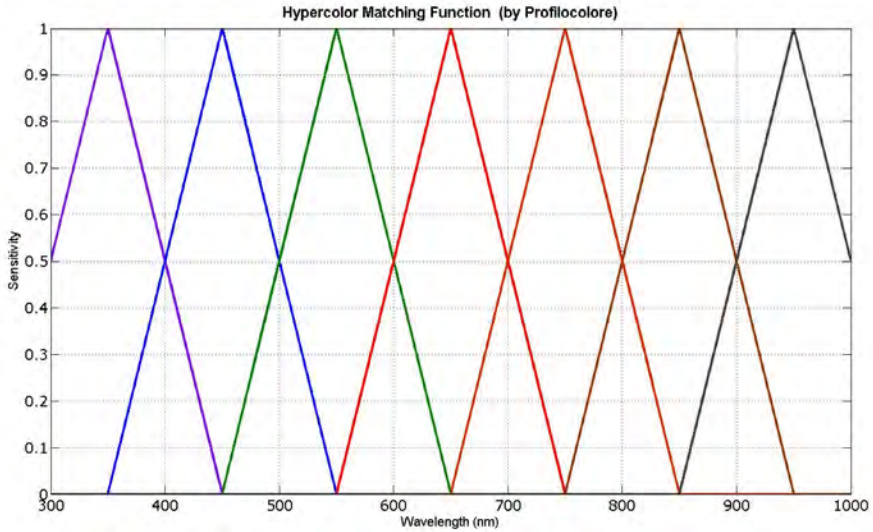
Figura 16: Funzioni della Colorimetria standard, di una colorimetria ideale, e della ipercolorimetria a banda larga



CMF, CIE '31, osservatore 2°



CMF ideali



HMF

Naturalmente, così come una fotocamera normale, standard, non sarà mai dotata di curve di sensibilità analoghe alle CMF della CIE, neanche la fotocamera Full Range, per quanto ottimizzati possano essere i filtri passa-banda utilizzati, presenterà mai curve di sensibilità analoghe alle HMF.

In colorimetria la trasformazione matematica del risultato delle curve di sensibilità spettrale (Figura 5) nei risultati che darebbero le CMF avviene attraverso quello che viene chiamato profilo di colore della fotocamera, standardizzato dall'International Color Consortium che tra l'altro stabilisce come devono essere strutturati i dati che rappresentano il profilo di colore, sia che siano embedded sia che siano in un file esterno (.ICC).

Nella ipercolorimetria sviluppata da Profilocolore avviene qualcosa di analogo, ma decisamente più sofisticato, data la complessità del problema. Innanzitutto è necessario raccogliere informazioni (immagini) da 7 bande. Questo avviene eseguendo uno scatto negli ultravioletti (con opportuno filtro passa-banda), uno scatto nel visibile (con filtro che ripristina il funzionamento normale della fotocamera) che quindi fornisce le tre bande R, G e B, e tre scatti negli infrarossi che segmenteranno la banda 700-1.000 nanometri in tre parti. Vediamo concretamente un esempio.

Per prima cosa è necessario acquisire una immagine per ogni banda definita, in particolare per gli ultravioletti nella banda dai 300 ai 400 nanometri, per il visibile nella banda dai 400 ai 700 nanometri, per gli infrarossi la banda IR1 (700-800 nanometri), la banda IR2 (800-900 nanometri) e la banda IR3 (900-1.000 nanometri).

Figura 17: Scatti originali (da RAW/NEF) nelle bande UV, Visibile, IR1, IR2, IR3

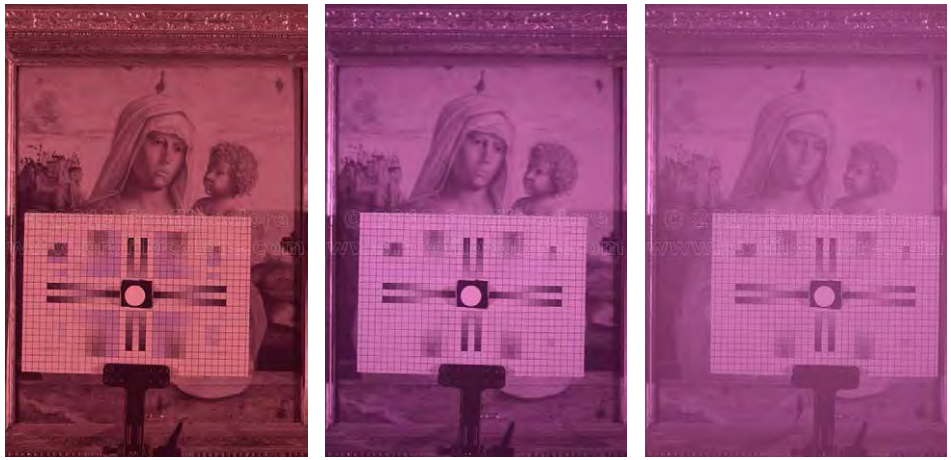
UV | Visibile (RGB)

IR1 (700-800nm) | IR2 (800-900nm) | IR3 (900-1000nm)

La stessa serie di immagini va acquisita inserendo un target di riferimento le cui riflettanze, per ogni singolo quadrato di colore o bianco, siano state precedentemente misurate accuratamente con uno spettroradiometro. Queste misure sono della massima importanza perché rappresentano il punto di collegamento tra la precisione di riflettanza misurata tramite fotocamera Full Range e riflettanza reale (nei laboratori di Profilocolore viene impiegato uno strumento della System Instrument con calibrazione tracciabile e riconducibile agli istituti metrologici internazionali).

Figura 18: Scatti originali (da RAW/NEF) nelle bande UV, Visibile, IR1, IR2, IR3

UV | Visibile (RGB)

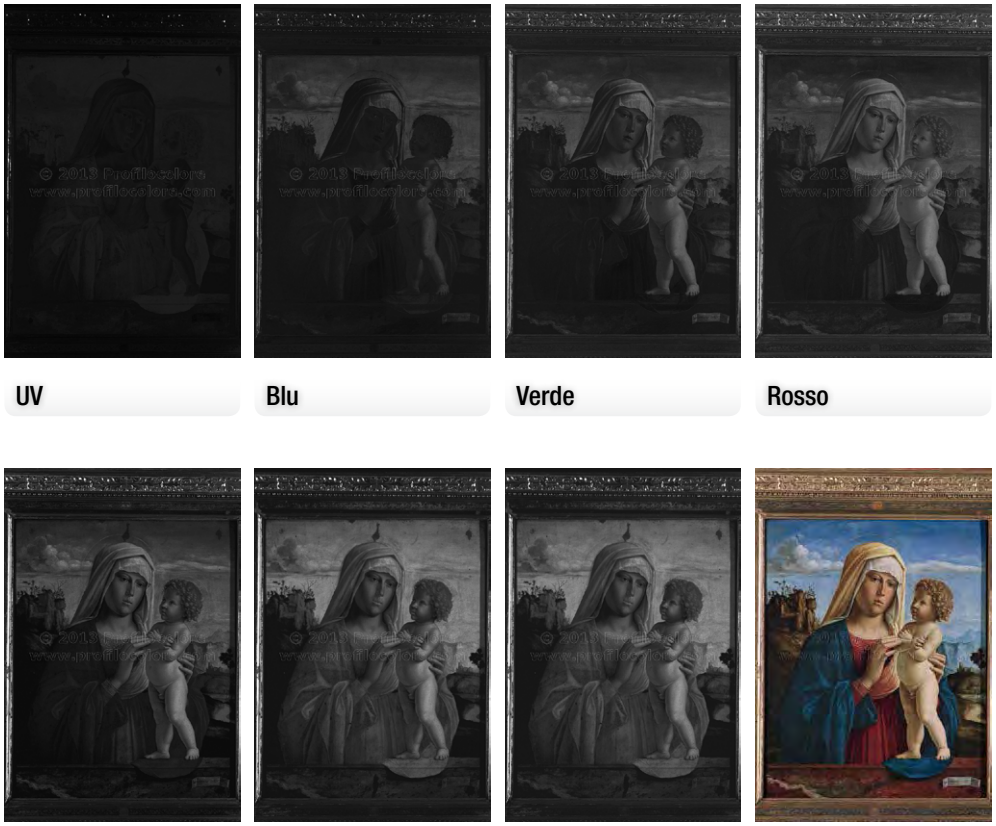


IR1 (700-800nm) | IR2 (800-900nm) | IR3 (900-1000nm)

I dati estratti dalle immagini dei target, insieme agli analoghi dati misurati in laboratorio, diventano l'input di un sistema di ottimizzazione che sintetizza, per quanto complesse le relazioni matematiche che trasformano i valori degli scatti originali in una misura di riflettanza spettrale. Il metodo ha raggiunto una tale precisione che riusciamo ad avere la riflettanza spettrale puntuale con una accuratezza che si discosta non più del 2% rispetto alla misura fatta con uno spettroradiometro calibrato.

Gli scatti originali, per quanto eseguiti con estrema accuratezza, non potranno mai coincidere pixel per pixel, anche perché al variare della lunghezza d'onda, come abbiamo visto, cambiano gli indici di rifrazione nei vari vetri dell'obiettivo e quindi cambia la messa a fuoco. Con questa cambia, anche se di pochissimo ed in relazione allo schema ottico in uso, il rapporto di ingrandimento e di conseguenza per una perfetta messa a registro tra le immagini alle varie bande sarà necessaria una operazione di scala, rotazione e traslazione attraverso una trasformazione affine. Il risultato finale della calibrazione attraverso il target di riferimento e della messa a registro delle immagini è un set di 7 immagini monocromatiche corrispondenti alla riflettanza del soggetto alle lunghezze d'onda di 350, 450, 550, 650, 750. 850 e 950 nanometri.

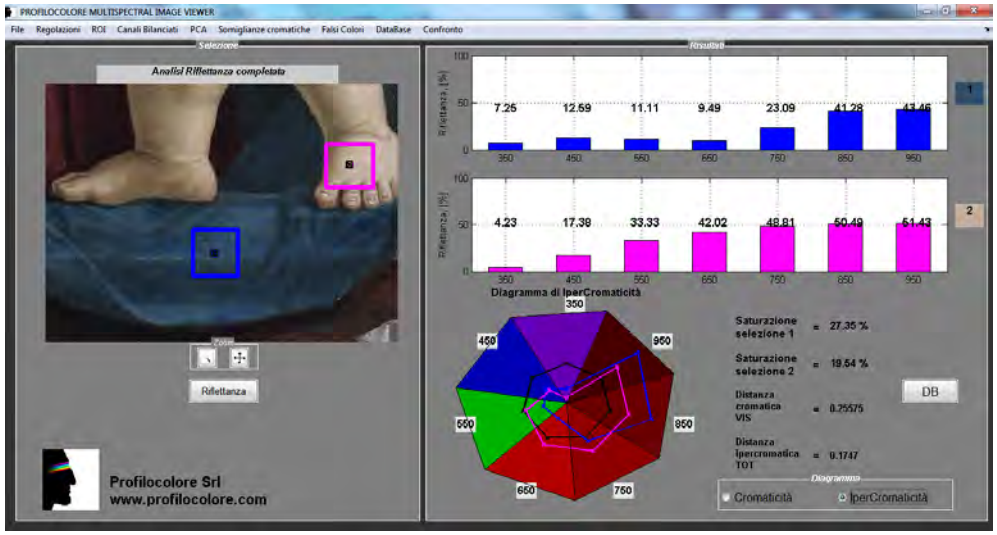
Figura 19: Risultato della calibrazione e messa a registro delle immagini prese nelle varie bande



Oltre alle immagini nelle singole bande con valori calibrati e corrispondenti alle riflettanze, dagli scatti iniziali e dai dati del target di riferimento si ricava anche una immagine nel visibile (ultima di Figura 19) colorimetricamente corretta, espressa nello spazio AdobeRGB in TIFF a 16 bit e piena risoluzione. Questa immagine è quindi ideale per qualsiasi tipo di stampa di alta qualità.

Profilocolore ha sviluppato un software dedicato allo studio ed alla analisi delle immagini acquisite in questo modo, cioè dedicato a queste immagini di riflettanza spettrale puntuale. Utilizzando questo software è possibile leggere sull'immagine le riflettanze spettrali di qualsiasi coppia di punti, farne il grafico e metterle a confronto.

Figura 20: Analisi della riflettanza di due punti sul dipinto



Riflettanze spettrali medie relative a due piccole aree di 11x11 pixel

Nella Figura 20 vediamo le riflettanze spettrali medie relative a due piccole aree di 11x11 pixel (quadratini neri circondati da quadrato blu e quadrato magenta sulla immagine a colori). Le riflettanze spettrali corrispondenti (colore con colore) sono in alto a destra, e vale la pena confrontare le barre percentuali di riflettanza con le 7 immagini della Figura 19. Il punto sul mantello blu presenta una maggiore chiarezza nel blu (450nm) rispetto agli UV (350), al verde (450) ed al rosso (550), come visibile anche sulle immagini delle singole bande. Ed ancora il primo infrarosso IR1 è più basso degli IR2 ed IR3.

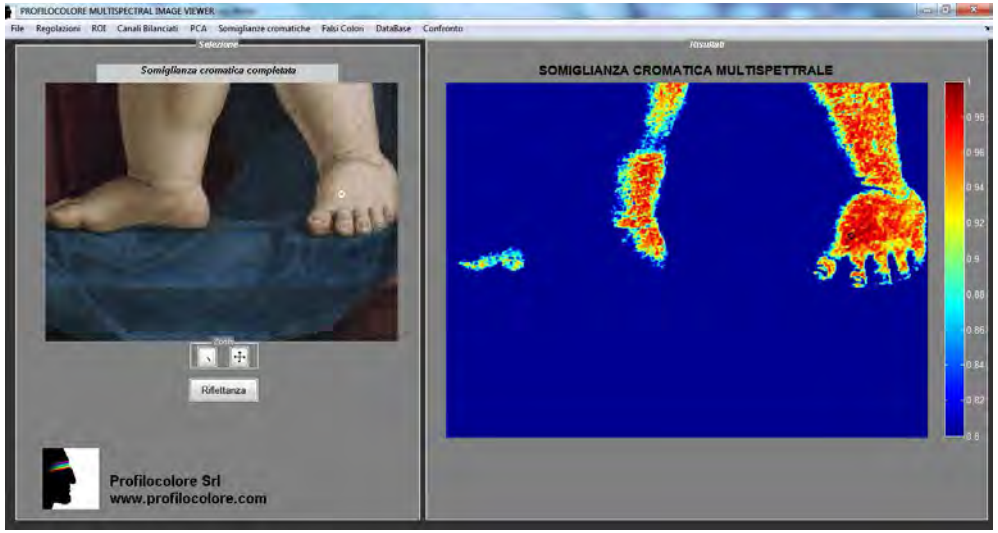
Nel secondo punto (riquadro magenta) la componente agli UV è molto più bassa delle altre, ed infatti il piede e tutto l'incarnato risulta nero nella immagine UV.

La disponibilità di una tale massa di informazioni puntuali, con la loro accuratezza, consente operazioni estensive come ad esempio cercare nella scena tutti quei punti che abbiano somiglianza spettrale con uno dato, impossibili con qualsiasi altro mezzo di analisi. La rifleattanza spettrale, se pur campionata, in modalità imaging, disponibile cioè per ogni punto della scena, rappresenta una rivoluzione in molti campi di ricerca applicata ed analisi.

Non si intende dire che non esistano sistemi simili: sono presenti sul mercato camere così dette iperspettrali che forniscono per ogni punto l'intera riflettanza spettrale continua, ed esistono altri tipi di camere a riflettanza spettrale campionata. La particolarità della soluzione Full Range di Profilocolore risiede in un paio di dettagli che la rendono unica.

Innanzi tutto è basata su fotocamere commerciali di un gigante della fotografia digitale: questo vuol dire che la qualità raggiunta, l'affidabilità, l'ergonomia, la stabilità e la precisione dell'intero complesso fotocamera e sensore si avvantaggiano di un bacino di utenza enorme, pressoché infinito se paragonato al numero di utenti si sistemi di ripresa specializzati ed utilizzati sono in nicchie applicative. Il grande volume di fotocamere per fotografia ha alimentato economicamente uno straordinario sforzo di ricerca e sviluppo neanche lontanamente paragonabile a quello che sta dietro lo sviluppo di strumenti più specializzati. Il fatto che la modifica, pur se progettata presso Profilocolore, che realizza con mezzi industriali professionali le parti ottiche da utilizzare, venga fisicamente effettuata scrupolosamente e rigorosamente da personale specializzato della assistenza ufficiale Nikon, nella LTR, consente all'utente finale di acquistare una fotocamera Full Range che conserva integra la garanzia, esattamente come gli equivalenti modelli non modificati.

Figura 21: Analisi della somiglianza spettrale tra pixel



Somiglianza spettrale tra un punto (cerchietto bianco su immagine a sinistra) ed il resto del dipinto

Con l'avvento dei sensori digitali e della matrice di Bayer è iniziata una vera e propria rivoluzione di cui pochi si sono resi conto: il sensore in se non è più sufficiente per fornire una immagine, ma questa viene fuori dal complesso sensore-software. Infatti se dovessimo guardare l'immagine così come esce in modo nativo dal sensore (formato RAW/NEF) ci apparirebbe una immagine quasi nera, monocromatica, con pixel adiacenti di valore anche molto diverso e sicuramente non comprensibile ad occhio nudo.

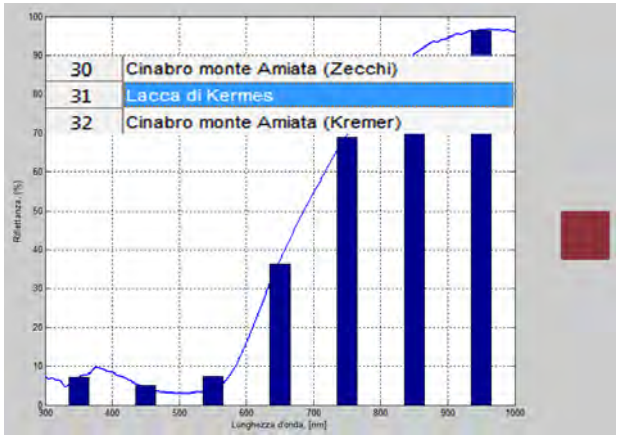
Abbiamo appena visto cosa si può ottenere da una fotocamera Full Range da sola (Figura 17), con l'aiuto di qualche filtro ottico, e cosa si può ottenere invece da un vero e proprio sistema integrato hardware e software (Figure 19, 20 e 21). La differenza è enorme e la quantità di informazioni ricavabili dal sistema integrato non ha fine.

Nel nostro software, ad esempio, abbiamo integrato un database di riflettanze spettrali di molti pigmenti (cortesemente forniti dall'Opificio delle Pietre Dure di Firenze) ed una delle operazioni possibili è quella di interrogare il database a partire dalla firma spettrale di un punto del dipinto fotografato. Se non ci sono particolari sovrapposizioni di pigmenti (velature) e la zona analizzata può considerarsi uniforme, allora sarà facile ritrovare nel database la firma spettrale del pigmento ed il suo nome.

Figura 22: Contenuto del database di riflettanze spettrali integrato nel software di analisi

	Nome Pigmento
17	Polvere di marmo
18	Bianco San Giovanni (Zecchi)
19	Biacca (Kremer)
20	Biacca (Ottaviano)
21	Giallo PbSn (Kremer)
22	Giallo PbSn II
23	Orpimento (Kremer)
24	Ocra gialla (Lukas?)
25	Coccio pesto
26	Minio
27	Ocra rossa
28	Cinabro monte Amiata (Zecchi)
29	Cinabro artificiale (Bizzarri)
30	Cinabro monte Amiata (Zecchi)
31	Lacca di Kermes
32	Cinabro monte Amiata (Kremer)
33	Caput
34	Ematite
35	Pozzolana media
36	Azzurrite

Elenco (parziale) delle firme spettrali nel database



Esempio elemento nel database: nome, riflettanza spettrale continua (linea), riflettanza campionata da fotocamera Full Range (barre verticali) e quadrato colorimetrico sRGB

Una ulteriore funzione disponibile solo grazie alla riflettanza imaging è quella della analisi alle componenti principali (PCA: principal components analysis). Per una spiegazione dettagliata si rimanda ad una ricerca sul web, perché questa analisi implica l'uso di una matematica superiore e la sua spiegazione nel dettaglio esula da questo eXperience, ma possiamo ugualmente comprenderne la potenza da un esempio.

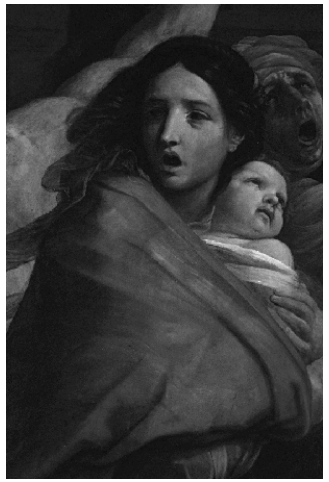
Si tratta della "Strage degli Innocenti" di Guido Reni, visitabile presso la Pinacoteca Nazionale di Bologna.

Nel completare il dipinto l'Autore ha avuto ad un certo punto un ripensamento (o "pentimento", come lo chiamano gli addetti ai lavori) ed ha deciso di ridipingere la scena di una donna con un bambino in braccio spostandola più in alto, e quindi dipingendo la nuova scena sopra quella vecchia, che ovviamente non è più visibile ad occhio nudo.

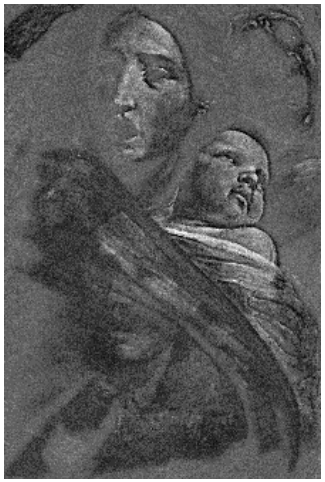
Però, grazie ad una combinazione di pigmenti ed all'uso delle lunghezze d'onda degli infrarossi, con un po' di attenzione si riesce ancora a percepire il vecchio disegno sottostante.

Figura 23: Analisi di un pentimento attraverso un solo canale (IR3) ed attraverso le componenti principali (PCA)

Visibile



IR3



PCA (ingrandimento)

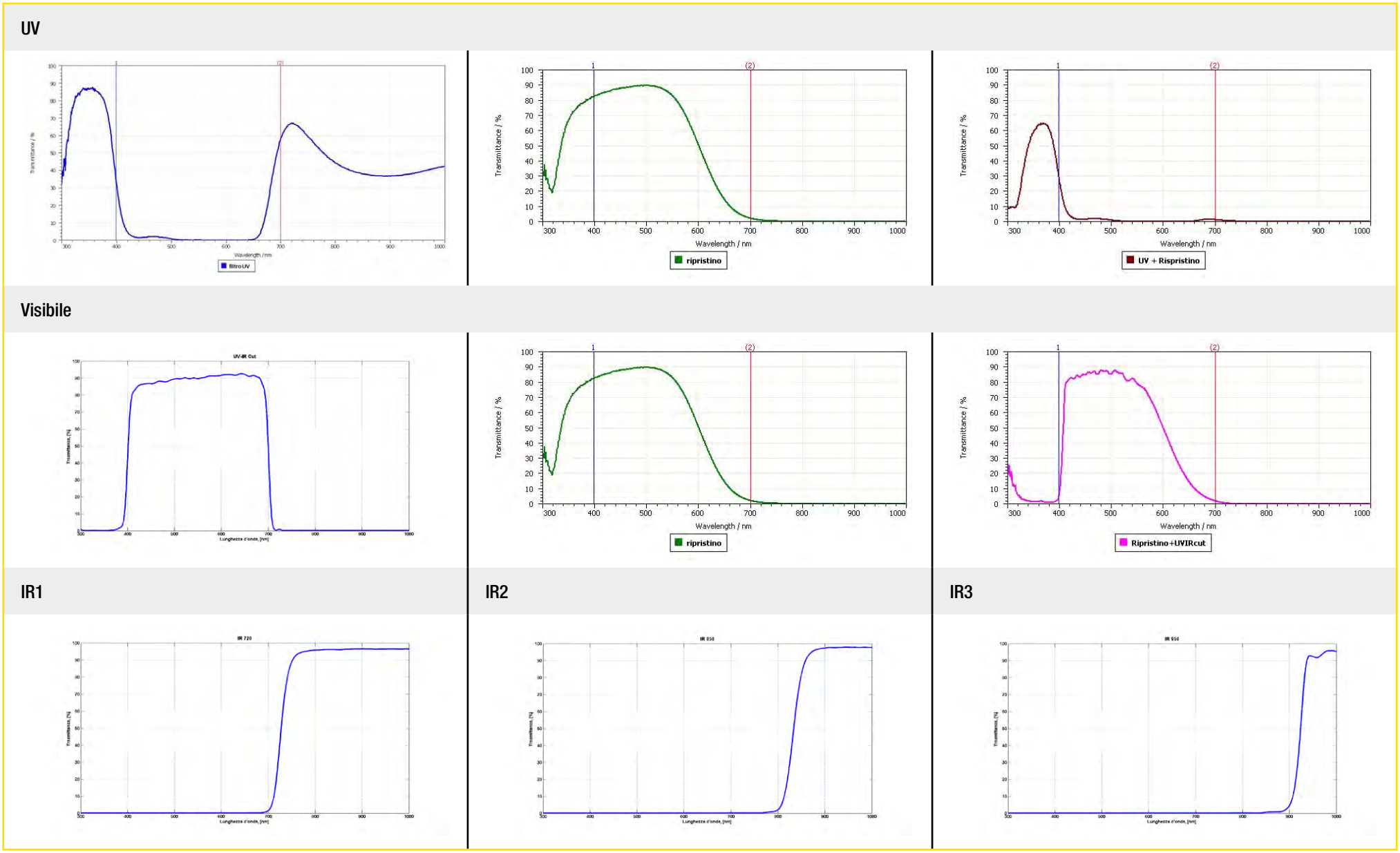
Da questi primi esempi dovrebbe essere ormai chiara la potenza analitica della integrazione hardware/software, rispetto all'utilizzo della sola fotocamera Full Range in una delle bande possibili.

Il sistema completo consiste nella fotocamera D800FR, un set di filtri appositamente messo a punto, un target di calibrazione anch'esso studiato e messo a punto appositamente, e tutto il software necessario per la trasformazione degli scatti iniziali in RAW/NEF in una serie di piani monocromatici con valore di misura.

Figura 24: Filtri Profilocolore per le riprese di riflettanza spettrale

Filtri Profilocolore per le riprese di immagini di riflettanza spettrale

Figura 25: Trasmittanze dei filtri del sistema di misura in riflettanza campionata

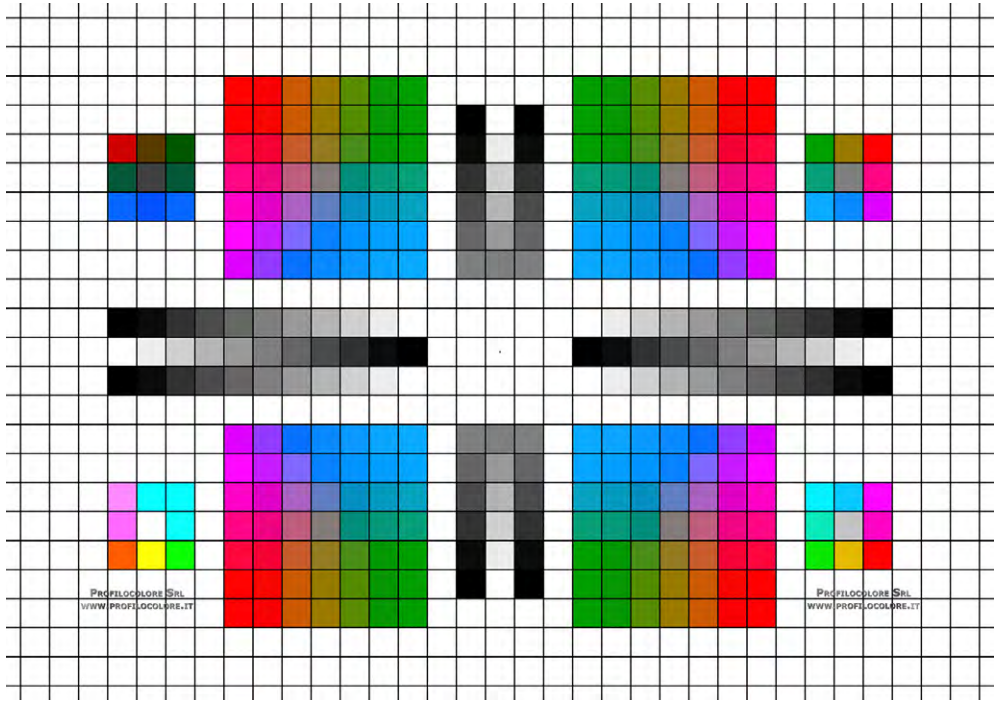


Filtri (o combinazioni di filtri) per i 5 scatti iniziali delle riprese in riflettanza spettrale campionata

Il terzo elemento fondamentale costituente il sistema di ripresa in riflettanza è il target di calibrazione. Questo è un pannello suddiviso in una scacchiera di colori e di scale di grigio, arricchito da una superficie con riflettanza costante del 98% dai 200 ai 2.000 nanometri e da una superficie (è un tessuto) che ha una riflettanza costante del 3% su tutta la banda di interesse della ripresa. Il complesso delle tacche di colore e delle tacche on gli stremi di riflettanza viene accuratamente misurato in laboratorio con spettroradiometro calibrato e precisione tracciabile rispetto ad istituto metrologico.

Le misure fatte in laboratorio ed il risultato delle immagini nelle varie bande vengono utilizzati per costruire le funzioni matematiche di conversione della risposta della fotocamera ed ottenere quindi pixel per pixel la misura di riflettanza spettrale con errori massimi dell'ordine del 2%.

Figura 26: Esempio di target di calibrazione



Target di calibrazione per le riprese di riflettanza

Conclusioni

Nel mercato della fotografia digitale, grazie ad una concorrenza spietata ed ai continui investimenti delle più grandi case costruttrici, la qualità dei prodotti è sempre cresciuta a ritmi sostenuti. Le case che non sono riuscite a sostenere questo ritmo sono uscite dal mercato, e la loro lista è decisamente lunga. Tutto questo avviene a favore degli utenti che da una parte premiano le migliori scelte tecnologiche e dall'altra, acquistando i migliori prodotti forniscono i mezzi economici da investire ricerca e sviluppo, in un continuo circolo virtuoso.

Anche i produttori di strumenti di misura nel campo della radio fotometria hanno necessità di investire ingenti somme nella ricerca e nello sviluppo per stare al passo con l'innovazione tecnologica, ma il bacino di utenza su cui possono contare è decisamente meno ampio. Di conseguenza il costo di uno strumento di misura è di gran lunga superiore a quello di una fotocamera.

L'idea alla base dei prodotti Full Range di Profilocolore è proprio quella di sfruttare al massimo la qualità e l'affidabilità garantite oggi dalle fotocamere digitali, ma di utilizzarle in campi applicativi non convenzionali per la fotografia classica, attraverso la modifica della banda di sensibilità e lo sviluppo di un vero e proprio sistema integrato hardware e software.

Questo è quanto abbiamo fatto in Profilocolore, arrivando ad una soluzione compatta, trasportabile ed economica rispetto a sistemi simili ma che forniscono misure su un singolo punto o su una quantità di punti di molto inferiore ai 36 milioni della Nikon D800. Le potenzialità di un sistema di questo genere sono amplissime e vanno dalla diagnostica non invasiva per il mondo della Conservazione e del Restauro, ed in generale per i Beni Culturali, alla diagnostica in Medicina, fino all'analisi della scena in campo forense ed al monitoraggio ambientale.

Link Correlati

Sensibilità allo spettro dei sensori Nikon FX e DX: sulla via del colore

Geometrie ottiche e profondità di campo nelle fotocamere reflex digitali

Infrarosso IR ed Ultravioletti UV con Nikon D700 nel restauro di antichi dipinti Tibetani

Impiego di Spazi Colore estesi in Nikon ViewNX, Capture NX2 e stampa Inkjet

Fluorescenza visibile indotta da radiazione ultravioletta fotografata con Nikon DSLR

Nikon Picture Control: l'immagine su misura anche a luminosità negativa

Produrre foto di qualità per la stampa tipografica

Gestione colore e Nikon Capture NX 2

Garantire la coerenza dei colori delle stampe

Dagli Spettri di Luce al Tristimolo

Camera Sensor Ratings by DxOMark

Nikon Precision Technology

Nikon Instruments Applications

Intervista a Marcello Melis di Dino del Vescovo