Trasformazione evoluzionistica di una fotocamera reflex digitale in un sofisticato strumento per misure fotometriche e colorimetriche (oral)

[1]Marcello Melis, [1]Matteo Miccoli
[1]Profilocolore Srl – Roma, marcello.melis@profilocolore.it, matteo.miccoli@profilocolore.it

1. Introduzione

Da moltissimi anni, ormai, la strumentazione digitale ha preso l'avvento su quella analogica, salvo rari e particolari casi, e questo è dovuto sicuramente ad una fortissima evoluzione della microelettronica che ha portato ad enormi salti di qualità nella parte sensoristica degli strumenti, nelle tecnologie di conversione analogico/digitale e nella potenza di calcolo numerico.
Il mondo della fotografia digitale non sta percorrendo una strada diversa da questa ed infatti il mercato rende disponibili ogni anno nuovi e più sofisticati modelli di fotocamere digitali, con una sensibilità sempre più alta, a dispetto di photo-site sempre più piccoli e quindi risoluzioni spaziali (pixel) sempre più elevate.
Ma tra il mondo della strumentazione professionale e specialistica ed il mondo della fotografia digitale c'è una differenza fondamentale dovuta ai volumi di esemplari commercializzati. Il grande mercato non richiede la qualità colorimetrica e ottica di uno strumento di misura ma è attento alla "piacevolezza" delle immagini catturate. Ciò ha portato la ricerca e lo sviluppo delle grandi case a produrre camere digitali sofisticate ma lontane dall'essere uno strumento di misura colorimetrica. E di riflesso è evidente che la ricerca e l'innovazione della industria dell'imaging consumer beneficia di volumi economici ben superiori a quelli cui può accedere l'industria degli strumenti professionali. Il rovescio della medaglia è che è praticamente impossibile che l'industria della fotografia digitale guardi anche in minima parte ad applicazioni di nicchia.
Ma le potenzialità di questi prodotti, ed in particolare delle fotocamere reflex digitali, sono enormi anche al di fuori del loro uso comune, e con qualche accorgimento ed un appropriato software possono essere trasformate in strumenti di misurazione colorimetrica e fotometrica, accurati, precisi ed affidabili come quelli professionali, ma enormemente più economici.
In questo lavoro facciamo vedere come una reflex digitale di classe alta possa essere trasformata in un colorimetro e fotometro imaging, cioè in uno strumento per la misurazione della luminanza e delle coordinate colorimetriche pixel per pixel.

2. Funzioni colorimetriche standard e fotocamera

Nella colorimetria standard si definisce un osservatore standard, proposto dalla CIE nel 1931, caratterizzato da tre funzioni di sensibilità spettrale, le funzioni colorimetriche, in inglese "Color Matching Functions" (CMF). Gli integrali della distribuzione spettrale di potenza di una radiazione luminosa per le CMF producono una terna di valori, detti valori del tristimolo e costituenti un vettore nello spazio vettoriale del tristimolo. Il vettore tristimolo specifica colorimetricamente la radiazione luminosa considerata. A seconda del sistema di riferimento scelto in

© Profilocolore srl

questo spazio si ottengono le terne dei valori del tristimolo (X, Y, Z), (R, G, B), (L, M, S); …, ([1], [2]) .

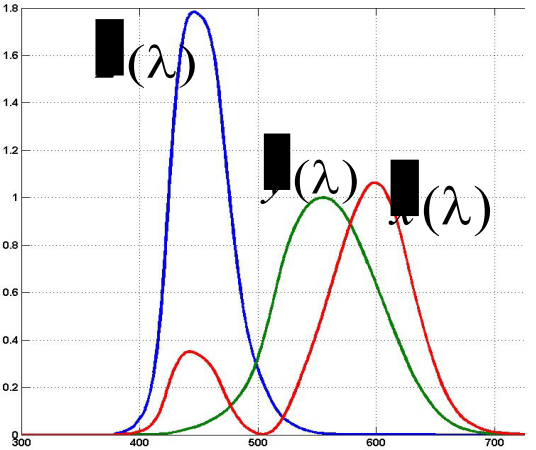

Figura 1- Funzioni colorimetriche $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ *standard CIE 1931 nel sistema di riferimento XYZ.*

Ogni fotocamera ha sue proprie CMF, differenti da quelle dell'osservatore standard. La caratterizzazione di una fotocamera richiede la misurazione delle sue CMF.

3. Caratteristiche di una fotocamera digitale e sensibilità spettrali

Le fotocamere commerciali sono dotate di sensori di immagini al silicio, ormai quasi esclusivamente CMOS, i cui photosite hanno la classica struttura Bayer (brevetto Kodak) costituita da 4 sensori, di cui due dotati di filtro verde, uno blu ed uno rosso. Poiché i 4 sensori del photosite si trovano affiancati e non sovrapposti, occorre integrare le informazioni nelle regioni in cui il sensore non esiste mediante interpolazione dei dati acquisiti. Tale operazione è nota come demosaicizzazione (Figura 2). In questo modo si ottengono immagini relative alle tre bande di sensibilità spettrale indicate convenzionalmente con Rosso, Verde e Blu (RGB).
Tutte le fotocamere reflex permettono di salvare l'immagine acquisita in formato RAW, ovvero in formato numerico nativo esattamente come viene prodotta dal sensore. Si ricorda che la creazione di un file jpeg nella fotocamera comporta varie operazioni, sinteticamente individuabili in:

1) demosaicizzazione,
2) bilanciamento del bianco,
3) codifica dei segnali secondo lo standard sRGB (riduzione della tavolozza dei colori),
4) correzione gamma (operazione introdotta agli albori delle immagini elettroniche televisive per correggere la non linearità tra luminanza emessa dai monitor CRT e segnale video),
5) compressione "lossy" (con perdita di informazioni) propria del formato jpeg (Il formato jpeg, il più usato è inadatto per ottenere informazioni colorimetriche e fotometriche.),

© Profilocolore srl

e sicuramente altre operazioni riguardanti i contrasti, la saturazione del colore, ecc. Tutte queste operazioni sfuggono all'operatore e comportano che la fotocamera non sia uno strumento di misurazione colorimetrica e fotometrica.
In questo modo di operare la riproduzione del colore è detta *corrispondente*.

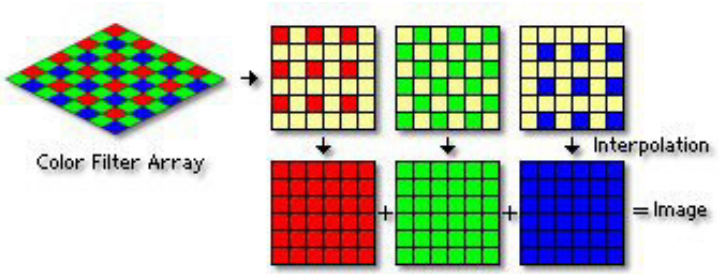

Figura 2- Schema che rappresenta la demosaicizzazione nel caso di photosite del tipo Bayer.

Questo lavoro considera solo i dati del formato RAW, e la fotocamera utilizzata è una Nikon D800 da 36megapixel, con conversione analogico/digitale a 14 bit.
Gli elementi primi che caratterizzano una fotocamera sono le sensibilità spettrali (CMF) dei tre tipi di sensori *RGB* che costituiscono i photosite e quindi l'intero sensore d'immagine. Queste sensibilità spettrali sono state misurate scegliendo la tecnica che porta a definire le sensibilità *fondamentali*. Si ricorda che le sensibilità spettrali sono riferite ad un sistema di riferimento nello spazio del tristimolo, che può essere fondamentale (per l'osservatore umano *LMS*), *XYZ*, *RGB* (da definire caso per caso perché "device dependent"), ecc, [3].
Attraverso un banco di misura formato da lampada allo Xenon, monocromatore, sfera di integrazione e spettroradiometro, abbiamo tracciato le curve di sensibilità fondamentali della fotocamera (Figura 3) facendo per ogni lunghezza d'onda considerata i rapporti tra segnali RGB dei photosite e le potenze delle radiazioni monocromatiche selezionate ed immesse nella sfera.
La generica radiazione che colpisce il sensore della fotocamera attiva i tre sensori in modo spettralmente pesato da queste tre funzioni e la attivazione risultante per ogni photosite e data da una terna di numeri (R, G, B), ([4], [5]).
Ogni modello di fotocamera ha curve di sensibilità spettrali sue proprie, il confronto tra le sensibilità delle fotocamere rivela un metamerismo proprio delle varie camere, sempre diverso da quello dell'osservatore umano standard. In pratica ci si trova a confrontare segnali di colori affetti da metamerismi diversi, da cui difficilmente si può uscire, a meno che non si abbia una camera con sensibilità spettrali identiche a quelle dell'osservatore standard. In questo caso la forma di metamerismo è una sola e quello strumentale della camera si identifica con quello dell'osservatore standard.

© Profilocolore srl

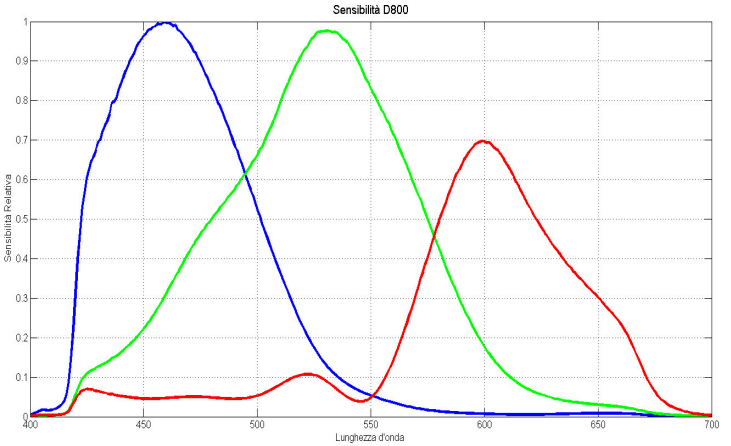

Figura 3- Sensibilità spettrali fondamentali dei tre fotorivelatori presenti nel sensore d'immagine della fotocamera, denotati con (r_{RAW}, g_{RAW}, b_{RAW}). La differenza tra queste funzioni e la CMF standard $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ di Figura 1 sono dovute essenzialmente alla diversità dei sistemi di riferimento, fondamentale questo e XYZ l'altro.

4. Sensibilità spettrali della fotocamera e osservatore standard

Per rendere la fotocamera uno strumento per la misurazione fotometrica e colorimetrica occorre che le CMF della camera siano prossime, idealmente uguali, a quelle dell'osservatore standard. Ciò è ottenibile in più modi e con diversa qualità, trasformando le CMF della camera in modo da riprodurre col minor scarto quelle dell'osservatore standard.

La tecnica più semplice è quella dei minimi quadrati che porta a definire tre combinazioni lineari delle CMF della camera $(x_c(\lambda), y_c(\lambda), z_c(\lambda))$ ad avere il minor scarto quadratico rispetto alle CMF $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ dell'osservatore standard

$$\begin{aligned} x_c(\lambda) &= M_{rx} r_{\mathrm{RAW}}(\lambda) + M_{gx} g_{\mathrm{RAW}}(\lambda) + M_{bx} b_{\mathrm{RAW}}(\lambda) \\ y_c(\lambda) &= M_{ry} r_{\mathrm{RAW}}(\lambda) + M_{gy} g_{\mathrm{RAW}}(\lambda) + M_{by} b_{\mathrm{RAW}}(\lambda) \\ z_c(\lambda) &= M_{rz} r_{\mathrm{RAW}}(\lambda) + M_{gz} g_{\mathrm{RAW}}(\lambda) + M_{bz} b_{\mathrm{RAW}}(\lambda) \end{aligned} \tag{1}$$

in cui la combinazione lineare è rappresentata dalla matrice **M** (Tabella 1):

$$\mathbf{M} = \begin{matrix} 2{,}38 & 0{,}02 & 0{,}05 \\ 1{,}23 & 0{,}87 & -0{,}31 \\ 0{,}15 & -0{,}37 & 1{,}65 \end{matrix}$$

Tabella 1- Combinazione lineare derivata dalla soluzione ai minimi quadrati.

© Profilocolore srl

Il risultato ottenuto è rappresentato dalla Figura 4:

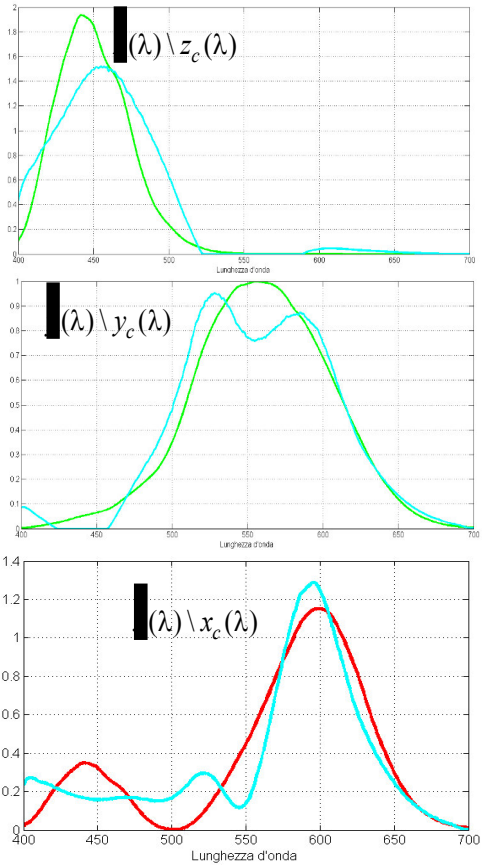

Figura 4- Funzioni colorimetriche della fotocamera $(x_c(\lambda), y_c(\lambda), z_c(\lambda))$, ottenute da una combinazione lineare delle sensibilità spettrali fondamentali, confrontate con le CMF $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ dell'osservatore standard CIE 1931.

L'ottimizzazione delle funzioni colorimetriche della fotocamera è stata migliorata tramite l'impiego di algoritmi genetici sviluppati ed ottimizzati da Profilocolore.
In generale questi algoritmi basano il proprio funzionamento sul meccanismo della selezione naturale e le principali differenze rispetto ai tradizionali algoritmi sono: una manipolazione diretta del codice, una ricerca della soluzione ottima all'interno di un insieme di soluzioni effettuata tramite operatori stocastici e non deterministici [6].
Nel corso della sua esecuzione un algoritmo genetico fa evolvere le soluzioni secondo il seguente schema logico (Figura 5):

1) Avviene la generazione random della prima popolazione di soluzioni (cromosomi);

© Profilocolore srl

2) viene applicata la *funzione fitness* alle soluzioni della popolazione corrente, in maniera tale da poter classificare all'interno della famiglia corrente quale individuo rappresenta la migliore soluzione del problrma in esame;
3) vengono selezionate le soluzioni considerate migliori in base al risultato della funzione fitness e della logica di selezione scelta;
4) si effettua il *crossover* per generare delle soluzioni ibride, cioè si genera una nuova soluzione mescolando delle soluzioni esistenti;
5) si applica la *mutazione* che permette di effettuare un'alterazione casuale di una soluzione;
6) viene creata la popolazione successiva e la procedura viene rieseguita utilizzando la nuova popalazione.

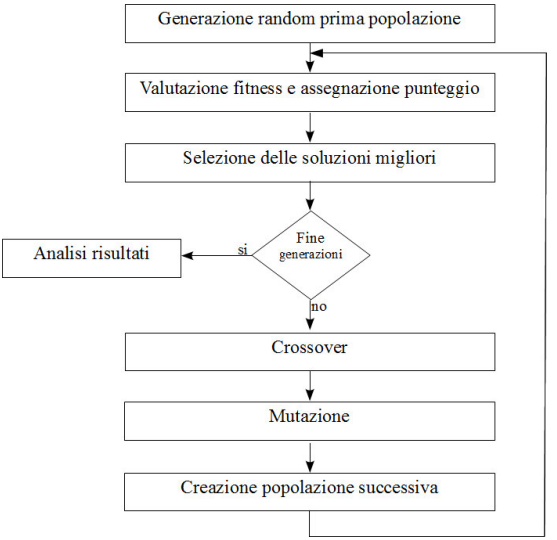

Figura 5- Workflow base di un algoritmo genetico.

Tramite l'algoritmo genetico sono state quindi sintetizzate delle LUT (Look Up Table):

$$\begin{aligned}
\bar{x}_c(\lambda) &= K_{rx}F_{rx}(r_{\mathrm{RAW}}(\lambda)) + K_{gx}F_{gx}(g_{\mathrm{RAW}}(\lambda)) + K_{bx}F_{bx}(b_{\mathrm{RAW}}(\lambda)) \\
\bar{y}_c(\lambda) &= K_{ry}F_{ry}(r_{\mathrm{RAW}}(\lambda)) + K_{gy}F_{gy}(g_{\mathrm{RAW}}(\lambda)) + K_{by}F_{by}(b_{\mathrm{RAW}}(\lambda)) \\
\bar{z}_c(\lambda) &= K_{rz}F_{rz}(r_{\mathrm{RAW}}(\lambda)) + K_{gz}F_{gz}(g_{\mathrm{RAW}}(\lambda)) + K_{bz}F_{bz}(b_{\mathrm{RAW}}(\lambda))
\end{aligned} \tag{2}$$

dove i fattori ***K*** (Tabella 2) sono convenienti fattori numerici e le funzioni *F* sono le LUT, rappresentate graficamente nella Figura 6. La non linearità della trasformazione è indicata dal fatto che le funzioni *F* sono rappresentabili con tabelle numeriche (qui visualizzate graficamente in Figura 6).

© Profilocolore srl

$$\mathbf{K} = \begin{matrix} 0,73 & 1,23 & -0,76 \\ 0,14 & 1,49 & -0,78 \\ 0,21 & -1,34 & 2,13 \end{matrix}$$

Tabella 2- Combinazione lineare da applicare in seguito alle LUT sintetizzate tramite algoritmo genetico.

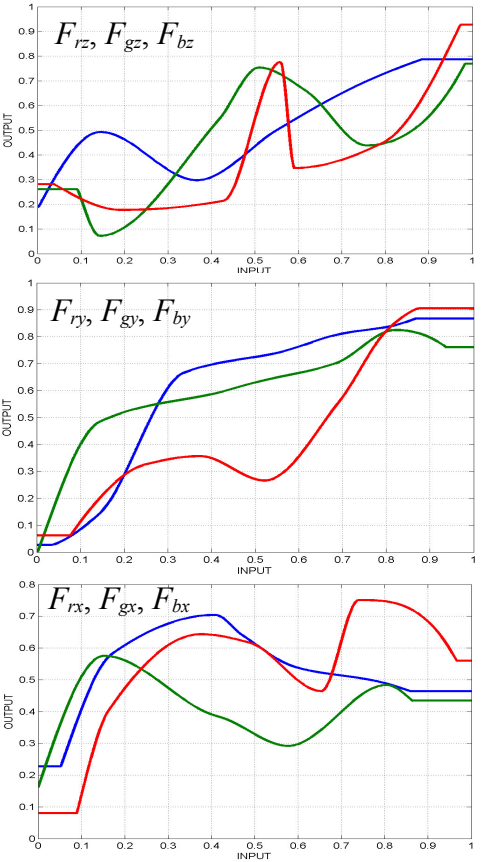

Figura 6- LUT rappresentate dai grafici delle funzioni F_{rz}, F_{gz}, F_{bz}, F_{ry}, F_{gy}, F_{by}, F_{rx}, F_{gx}, F_{bx} (a partire dall'alto). In input si hanno le grandezze provenienti dalla camera (r_{RAW}, g_{RAW}, b_{RAW}). L'input e l'output sono normalizzati ad 1, per cui occorrono i fattori K per ottenere le scale uguali a quelle delle CMF standard (2).

In Figura 7 vengono confrontate le CMF della camera ottenute applicando le LUT di Figura 6 con quelle dell'osservatore standard (Figura 1).

© Profilocolore srl

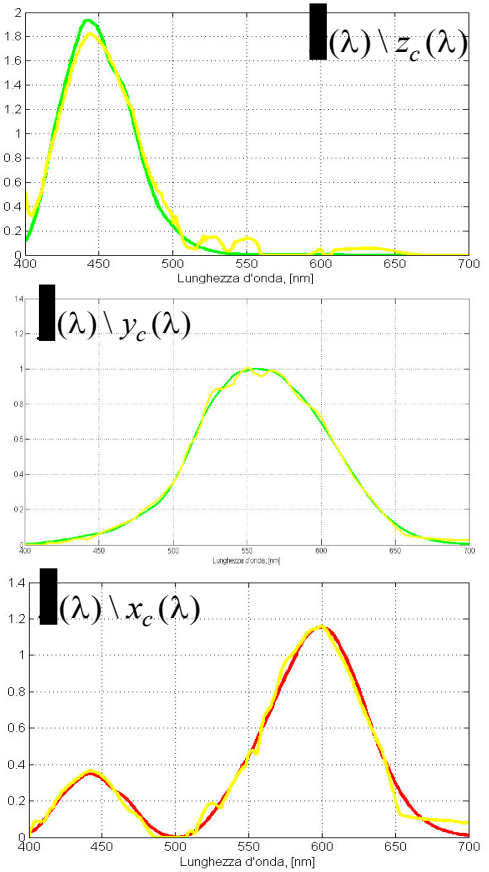

Figura 7- Funzioni colorimetriche della fotocamera $(x_c(\lambda), y_c(\lambda), z_c(\lambda))$, ottenute da LUT, confrontate con le CMF $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda))$ dell'osservatore standard CIE 1931.

Queste LUT sono state ottenute utilizzando 6 radiazioni luminose a banda spettrale di circa 35 nm, generate con lampada Xenon e monocromatore, distribuite su tutto lo spettro visibile (Figura 8). Le radiazioni luminose sono state misurate radiometricamente e specificate colorimetricamente con 6 terne di numeri (X_i, Y_i, Z_i) i=1, …, 6 (spettroradiometro Instrument System CAS 140CT con taratura tracciabile a Laboratorio Metrologico) e specificate con la camera mediante 6 terne di dati RAW ($R_{RAW,i}$, $G_{RAW,i}$, $B_{RAW,i}$) i=1, …, 6.
Le funzioni F delle LUT (Figura 6) sono il risultato di un algoritmo genetico che ha minimizzato la differenza tre i dati colorimetrici (X_i, Y_i, Z_i) e quelli ottenuti dai dati RAW della camera ($R_{RAW,i}$, $G_{RAW,i}$, $B_{RAW,i}$).

© Profilocolore srl

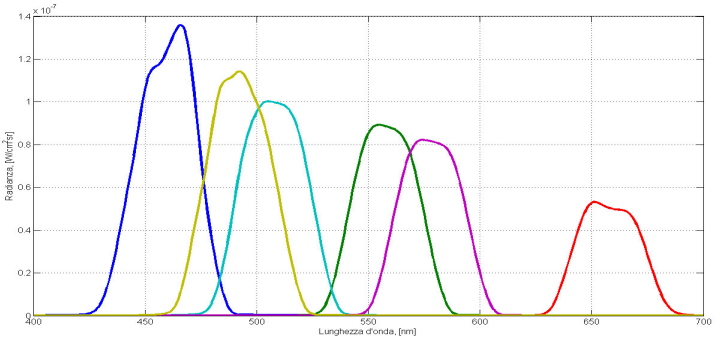

Figura 8- Spettri delle 6 bande spettrali usate per la costruzione delle LUT.

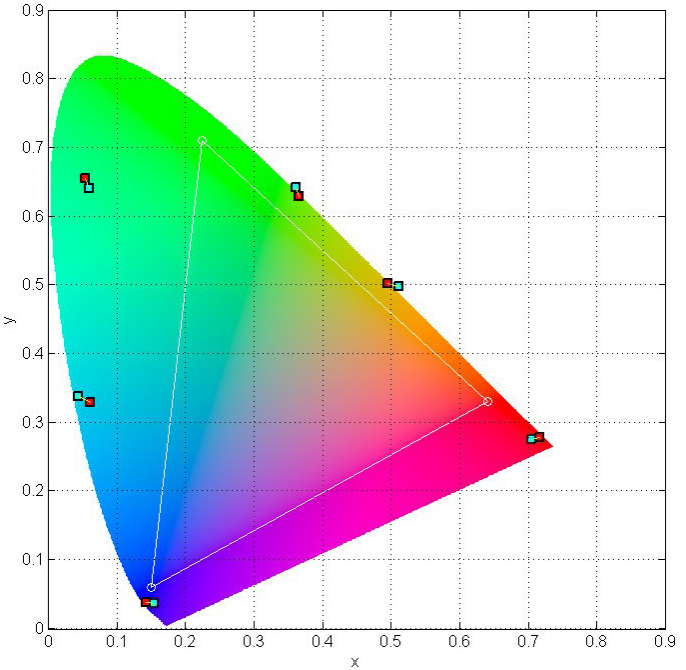

Figura 9- I quadratini rossi rappresentano le coordinate cromaticità misurate strumentalmente (xi,yi), ed i quadratini azzurro chiaro sono le coordinate cromaticità ottenute dalla fotocamera e trasformate con le le LUT. Lo scarto tra le due misurazioni è dell'ordine del 2-3%.

La prima verifica della qualità del risultato ottenuto con le LUT è data dal confronto delle cromaticità (x_i,y_i) delle 6 radiazioni luminose usate con le corrispondenti calcolate con le LUT dai dati RAW della camera (Figura 9).

5. Conclusioni

La fotometria e la colorimetria sono definite su un osservatore teorico standard, il quale a sua volta è definito da tre funzioni di sensibilità spettrali, le funzioni

© Profilocolore srl

colorimetriche o CMF. Ogni strumento per misurazioni fotometriche e/o colorimetriche deve riprodurre il comportamento delle CMF standard. Ciò può avvenire in modo hardware o software: nel primo caso la misurazione è direttamente fotometrica/colorimetrica, mentre nel secondo caso la misurazione è radiometrica e le grandezze fotometriche/colorimetriche sono ottenute col calcolo. La fotocamera tricromatica rientra negli strumenti del primo caso. Per ragioni pratiche, ragioni di mercato e difficoltà tecniche la fotocamera non è uno strumento che dia direttamente i risultati della misurazione fotometrica/colorimetrica. Occorre estrarli e ciò avviene solo con approssimazione e dipende anche dalla tecnica matematica impiegata.
Questo lavoro ha attuato due tecniche matematiche differenti ed ha mostrato che raffinando la tecnica il risultato può migliorare molto. Lo stato attuale dello studio fatto consente di dire che le misurazioni fotometriche/colorimetriche d'immagine ha raggiunto un livello di incertezza inferiore al 2-3% (Figura 9) e ciò è da ritenersi soddisfacente per la maggior parte delle esigenze del mercato. Si prevede che questo risultato, già molto apprezzabile, possa essere ulteriormente perfettibile.
Certamente, non tutte le fotocamere presentano la stessa qualità di filtri nella matrice di Bayer, e questo può essere un ostacolo al raggiungimento della precisione mostrata sopra.
Riteniamo che l'uso di fotocamere per misure imaging colorimetriche e fotometriche si diffonderà sempre di più ed in modo più capillare, considerando anche l'attenzione sempre più alta che viene posta nella progettazione dei sistemi di illuminazione, e delle normative sempre più stringenti sulla qualità dei posti di lavoro e sul controllo della economicità dei sistemi di illuminazione.

Bibliografia

[1] C.Oleari, "Misurare il Colore", HOEPLI, 2012.
[2] D. Malacara, "Color vision and colorimetry. Theory and applications", SPIE Press, 2011.
[3] J. Nakamura, "Image sensors and digital signal processing for digital still cameras", CRC Press, 2006.
[4] J. Palmer, B. Grant, "The art of radiometry", SPIE Press, 2010.
[5] R. Fiete, "Modeling the imaging chain of digital cameras", SPIE Press, 2010.
[6] D. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, Reading,1989.

© Profilocolore srl