

**Caratterizzazione
di colore e aspetto
nell'industria
automobilistica**



Caratterizzazione di colore e aspetto nell'industria automobilistica utilizzando BRDF (funzione differenziale di riflettanza bidirezionale) ed un nuovo spettrofotometro multi-angolo portatile

Gli elementi plastici colorati sono composizioni chimiche complesse che richiedono processi di lavorazione avanzati, che si innovano ed evolvono continuamente. Attraverso l'adozione dei nano-materiali e di processi e controlli legati alle micro-tecnologie, gli ingegneri hanno sviluppato sistemi che consentono di avere minori costi e soluzioni di design innovative, in grado di avere il fascino evocativo richiesto dai designer.

Le tradizionali misurazioni spettrofotometriche sferiche e compari risultano insufficienti quando è necessario caratterizzare i moderni elementi plastici colorati. Questo articolo illustra una innovativa combinazione dell'applicazione di un approccio BRDF spaziale sottocampionato (comprendente geometrie extra-planari), e di un semplice modello fenomenologico in grado di catturare sia i contributi della formulazione a livello di nanoscala e microscala, che i contributi legati al processo applicativo, nel determinare l'aspetto complessivo del prodotto. Vengono presentate geometrie di campionamento spettrofotometrico consigliate, oltre ad esempi di formulazione, variazioni di distribuzione tra lotti, variazioni di processi, e separabilità dei contribuenti.

Premesse

Per materiali in cui lucidità, tessitura ed altri effetti giocano un ruolo importante, il processo di scelta, definizione e controllo della produzione si basa ancora sull'utilizzo di campioni fisici e sulla loro valutazione visiva. I tradizionali metodi di misurazione e comunicazione del colore non sono legati direttamente al controllo dei processi produttivi, e non sono adatti a comprendere le cause originarie del verificarsi di errori. I pigmenti utilizzati nei materiali plastici per la formazione di motivi e tessiture sono tra le applicazioni che potrebbero trarre grande vantaggio dall'utilizzo di sistemi digitali per definire, comunicare, e calcolare la resa visiva del loro aspetto finale.

L'aspetto visivo si ottiene da una combinazione tra rilevazione ed inferenza. La sua valutazione nel contesto di una osservazione arriva a chiamare in causa anche la riflettanza spettrale. Per effettuarla, serve formulare delle ipotesi base riguardo all'illuminazione, alle condizioni di osservazione, oltre che alle condizioni fisiche del campione esaminato, quale la sua forma e la sua tessitura. Lo scopo del nostro lavoro è di proporre una base per un processo di valutazione e comunicazione colore affidabile, utilizzando le definizioni di colore spettrale. A tal fine è necessario definire un metodo per convertire i concetti astratti legati alla descrizione dell'aspetto del colore, in un modello concreto e tecnicamente espressivo. La nostra ricerca, attualmente in corso, vuole estendere questo paradigma ad una definizione più ampia di aspetto totale, che comprenda il contesto e l'inferenza.

Partendo da una prospettiva legata alla misurazione, fondamentalmente si ha uno spettro-radiometro. Una sorgente è diretta verso un oggetto attraverso una data Funzione di Trasferimento Ottico (OTF). La luce che arriva sull'oggetto interagisce attraverso ciascuno strato di interfaccia dell'oggetto, seguendo le equazioni di Maxwell, e soggiacendo alla dispersione di Mie e Rayleigh. Qui è possibile campionare, partendo da una data direzione di osservazione, la risultante funzione di distribuzione riflettanza bidirezionale (BRDF), o la funzione di distribuzione riflettanza e dispersione subsuperficiale bidirezionale (BSSRDF). Questo insieme di campioni BRDF è raccolto da un sistema ottico avente una seconda OTF. Si rileva quindi l'OTF risultante e la si trasforma in termini di Contesto (definito e descritto nel seguito). Una volta che l'informazione è stata elaborata nel Contesto, il passo finale riguarda l'inferenza, che consente la creazione, la comunicazione, e la decisione.

La sfida legata alla misurazione del BRDF di un campione sta nel tempo necessario all'esecuzione delle numerose misurazioni Gonio-spettro-radiometriche, dato che si rendono necessarie molte combinazioni di angoli e geometrie di osservazione e di illuminazione. La nostra ricerca si è concentrata su misurazioni e dispositivi di misurazione portatili, dove tipicamente è difficile mantenere fermo questo tipo di strumento per più di 1/2 secondi. Pertanto, una misurazione deterministica rigorosa richiede un numero di coppie illuminazione/osservazione maggiore rispetto a quello effettivamente misurabile in questo lasso di tempo. Come può contribuire alla soluzione l'approccio di misurazione a sottocampionamento? Quali sono gli angoli importanti? Quali sono le informazioni spettrali maggiormente rilevanti?

La nostra piattaforma di misurazione dell'aspetto, descritta nel presente articolo, consiste di uno spettrofotometro multi-angolo compatto, combinato con un campionamento sparso di spettri di riflettanza direzionale per la tradizionale determinazione della BRDF (come mostrato in figura 1). Uno spettrofotometro a diodo basato su un filtro dielettrico supera le limitazioni di precisione e gamma dinamica di altri approcci, e fornisce una correlazione all'indietro alle misurazioni esistenti effettuate in geometrie planari. L'illuminazione e la misurazione da più angoli extraplanari fornisce un ricco insieme di dati, che consente di realizzare una descrizione completa dell'aspetto della superficie. Questa comune piattaforma è stata utilizzata per derivare una famiglia di strumenti destinata agli utenti che operano dalla progettazione alla produzione.

Il campionamento delle varie funzioni BRDF definisce la risposta risultante utilizzata per quantificare l'aspetto. Le misurazioni spettroscopiche multi-angolo producono grandi quantità di



dati. Per poter trattare questi dati, sono applicati modelli fisici rigorosi che consentono di stimare i parametri di descrizione dell'aspetto della superficie. Le ricerche nei campi dell'ottica, dell'elettromagnetismo, della computer graphics e della computer vision hanno consentito grandi progressi nelle tecniche di modellazione dell'aspetto delle superfici. Questi modelli sono stati utilizzati e perfezionati, per renderli applicabili ai campioni e ai processi applicativi industriali. È stato così sviluppato un insieme di parametri e di modelli di riflettanza di tipo BRDF per descrivere l'aspetto della superficie. Questi descrittori (parametri del modello) sono poi riportati in XML per formare l'ossatura del processo di definizione digitale dell'aspetto della superficie, dalla fase di ideazione fino alla creazione. Vedi Figura 2.

I dati BRDF possono essere derivati dalla misurazioni di uno spettrometro goniometrico, applicando i dati alla seguente espressione:

$$L_r(\mathbf{x}, \omega) = \int_{\Omega_x} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{x}, \omega') (\mathbf{n}_x \bullet \omega') d\omega'$$

dove L_r è la radianza riflessa in \mathbf{x} lungo la direzione ω . Ω_x è la semisfera delle direzioni entranti, f_r è la BRDF in \mathbf{x} e nel nostro caso contiene sia un termine speculare f_{rS} che un termine diffusivo f_{rD} tale che:

$$f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) = f_{rS}(\mathbf{x}, \omega', \omega) + f_{rD}(\mathbf{x}, \omega', \omega)$$

L_i è la radianza entrante e si lega al flusso con:

$$L_i(\mathbf{x}, \omega') = \frac{d^2\Phi(\mathbf{x}, \omega')}{(\mathbf{n}_x \bullet \omega') d\omega' dA_i}$$

Nel caso di un modello di trasporto fotonico multistrato, la forma dell'equazione di resa volumetrica è piuttosto diversa da quella sopra riportata, dovendo considerare sia la profondità ottica per ogni strato di dispersione, oltre che una funzione di fase che descriva la natura della funzione di dispersione stessa. L'equazione prende la seguente forma:

$$L_r(\mathbf{x}, \omega) = \int_0^s e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \sigma_a(\mathbf{x}') L_e(\mathbf{x}', \omega) d\mathbf{x}' + \int_0^s e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \sigma_s(\mathbf{x}') \int_{\Omega_{4\pi}} p(\mathbf{x}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{x}, \omega') d\omega' d\mathbf{x}' + e^{-\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}+s\omega)} L(\mathbf{x}-s\omega, \omega)$$

dove la profondità ottica $\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ è data da:

$$\tau(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \int_x^{x'} \sigma_t(t) dt$$

e la funzione di fase può assumere varie forme, in rapporto alla struttura del rivestimento e alla natura della dominante dispersiva nel materiale. La funzione di fase più comunemente utilizzata è la funzione di fase di Henyey-Greenstein che può essere utilizzata insieme alle differenze tra ciascuno strato e/o componente dispersivo. Questa assume la forma generalizzata:

$$p(\Theta) = \sum_{i=1}^N \frac{w_i(1-g_i^2)}{4\pi(1+g_i^2-2g_i\cos\Theta)^{1,5}}$$

dove $w_i=1$

Dove g_i controlla la forma di ciascun lobo, e w_i il suo peso. In rapporto alla complessità del rivestimento, il contesto di campionamento, ed il riferimento da effettuare, sono necessari

72-90 angoli di misurazione (canali) per una completa formulazione della BSSRDF, per un rivestimento di 3-4 strati come in una vernice utilizzata nell'industria automobilistica. All'altro estremo, bastano 10-12 angoli per una misurazione di tipo BRDF di un elemento plastico omogeneo dove l'aspetto principale riguarda le differenze di formulazione e di processo (e non di pura formulazione).

Scopo del lavoro

Gli attuali standard industriali per la misura di elementi plastici colorati utilizzano misurazioni spettrofotometriche goniometriche sferiche oppure planari. Il problema di questo approccio, è che i materiali plastici di oggi sono così complessi da richiedere almeno 3 dimensioni di analisi. Il contributo percettivo alla formulazione nel materiale plastico presenta variazioni nelle direzioni extraplanari. Le tradizionali geometrie planari ed i sistemi a camera singola non tengono in considerazione il fatto che gli effetti percettivi sono per loro natura goniometrici. Essi cambiano al variare delle condizioni di illuminazione e di osservazione. Oggi non misuriamo l'aspetto con una sfera, ne calcoliamo semplicemente una media. Le variazioni nell'aspetto dovute all'allineamento molecolare sono effetti di tipo percettivo. Oggi si misura solamente la dispersione media e la riflessione della luce sul campione. Poiché la BRDF (BSSRDF) risultante varia in modo multidimensionale, avranno questo comportamento anche gli effetti percettivi, come la tramatura e l'allineamento molecolare. I sistemi odierni non sono in grado di caratterizzare e comunicare in modo convincente l'impatto delle variazioni di processo e di formulazione sulla percezione visiva. Il nostro scopo è di presentare una soluzione hardware e software conveniente per ottenere questo risultato.

Procedura sperimentale

Ci sono due proprietà uniche dell'interazione tra luce e materia, che possono essere sfruttate nel processo di misurazione per capire di più sulla struttura e sulle caratteristiche di un materiale o di un rivestimento. La prima proprietà da considerare è il fatto che tutti i materiali sono dispersivi. Con questo intendiamo che la capacità di un materiale di deviare la luce (il suo indice rifrattivo) è diverso per la luce blu (400 nm) piuttosto che per la luce rossa (700 nm). Queste differenze nella capacità di deviazione sussistono indipendentemente dal colore apparente (proprietà assorbente) del materiale. Anche un materiale che appare nero o riflettente (come uno specchio) presenta dispersioni, a causa del fatto che la luce non interagisce semplicemente a livello di superficie, ma penetra anche al di sotto di essa, mentre viene riflessa o assorbita. (Ciò che in effetti è di particolare interesse è la costante dielettrica del materiale, che è dispersiva. L'indice rifrattivo complesso (potere di deviazione + assorbimento) è proporzionale alla radice quadrata della costante dielettrica). La seconda proprietà da considerare è la dispersione della luce all'interno di un materiale. La dispersione della luce all'interno del materiale può essere descritta in vari modi, ma in ogni caso anche la natura della dispersione dipende dalla lunghezza d'onda. La luce blu si disperde in modo diverso da come fa la luce rossa. Tutti i materiali disperdono luce in qualche modo, anche vetro all'apparenza perfettamente trasparente.



Attraverso precise misurazioni spettrofotometriche della luce dispersa da un materiale (o da un rivestimento), e confrontando le microscopiche direzioni privilegiate di distribuzione della luce blu rispetto a quella rossa, è possibile determinare la struttura e la costituzione fisica del materiale. L'energia si conserva. Pertanto, conoscendo le caratteristiche dell'energia di illuminazione e misurando le caratteristiche della luce riflessa da un materiale, è possibile risolvere modelli di complessità crescente, che consentono di determinare la struttura e la costituzione fisica di materiali e rivestimenti. La luce può essere solo riflessa, rifratta, dispersa o assorbita, ed in tutti i casi l'energia si conserva. (Vi sono molti altri modi con cui la luce può interagire con la materia, ed altre aspetti quali la polarizzazione, che potrebbero essere presi in considerazione e discussi, ma per semplicità essi verranno trascurati nella presente trattazione. Il caso speciale di interferenza si verifica ed è considerato successivamente, quando si utilizzano pigmenti con effetti speciali).

Probabilmente il modello più semplice da utilizzare deriva dalla teoria dell'elettromagnetismo ed è chiamata Teoria del Mezzo Efficace. La Teoria del Mezzo Efficace semplicemente postula che indipendentemente dalla complessità del rivestimento o del materiale, è possibile trattarlo come un unico materiale omogeneo. Un materiale descritto con 3 strati e 9 ingredienti viene trattato come se fosse un unico materiale composto da una media pesata degli ingredienti, con pesatura secondo la distribuzione sugli strati, il loro spessore, e la struttura all'interfaccia tra due strati adiacenti. Un materiale di una data formulazione (ricetta di ingredienti, con una struttura a strati definita) è caratterizzata da proprietà di dispersione univoche. Se qualcosa cambia nella formulazione, cambiano anche le proprietà univoche. Persino se la distribuzione della dimensione media delle particelle si modifica, con essa si modificano le proprietà di dispersione.

Insieme alla Teoria del Mezzo Efficace, uno dei metodi più semplici per caratterizzare il comportamento della dispersione della luce, è quello di misurare utilizzando un sistema di coordinate, dove la luce viene dispersa, in relazione al punto in cui emerge dal campione. È possibile rappresentare questa informazione come una polarizzazione, avanti/indietro e lateralmente rispetto alla grandezza corrispondente dell'energia luminosa che non viene assorbita. Maggiore la quantità di luce dispersa/riflessa in una data direzione, maggiore la grandezza. Se si effettua questa misurazione su ciascuna lunghezza d'onda, è possibile analizzare la natura dispersiva del materiale o del rivestimento. Utilizzando questa analogia, un materiale che è riflessivo in modo uniforme su tutte le lunghezze d'onda e disperde luce in modo uniforme in tutte le direzioni, non esibisce una polarizzazione verso alcuna direzione. Un materiale che approssima da vicino questo comportamento è lo Spectralon™ (chiamato anche Fluorolon™). Lo Spectralon appare di un bianco uniformemente diffuso sotto tutte le geometrie di illuminazione, e da tutti gli angoli di osservazione. Uno Spectralon ben preparato non presenta alcuna zona lucida o riflesso, anche ad angoli di incidenza critici.

Il modo più semplice per calcolare la polarizzazione di energia è di rappresentare ciascun angolo di osservazione come un vettore fisso, tracciato dal centro del campione fino al centro della pupilla di ingresso dello spettrometro. Viene creato un vettore per ciascuna lunghezza d'onda e ciascun angolo di osservazione, il cui modulo corrisponde alla quantità di energia misurata. La polarizzazione in questo modo si ricava semplicemente per somma vettoriale di tutti gli angoli di osservazione, per ciascuna lunghezza d'onda, ottenendo un vettore di polarizzazione per ogni lunghezza d'onda considerata. Questo processo, che prevede l'applicazione dell'ipotesi della Teoria del Mezzo Efficace, combinata con il calcolo delle somme vettoriali, fornisce la necessaria discriminante di caratteristica.

Gli attuali standard industriali per la misura di elementi plastici colorati utilizzano misurazioni spettrofotometriche goniometriche sferiche oppure planari. Il problema di questo approccio, è che i materiali plastici di oggi sono così complessi da richiedere almeno 3 dimensioni di analisi. Il contributo percettivo della struttura del materiale presenta variazioni nelle direzioni extraplanari. Le tradizionali geometrie planari ed i sistemi a camera singola non tengono in considerazione il fatto che gli effetti percettivi sono per loro natura goniometrici. Essi cambiano al variare delle condizioni di illuminazione e di osservazione. Non misureremo lucidità o opacità. Questi sono effetti percettivi. Si possono misurare solamente la dispersione e la riflessione della luce sul materiale. Poiché la BRDF (BSSRDF) risultante varia in modo multidimensionale, avranno questo comportamento anche gli effetti percettivi, come la lucidità o l'opacità.

Poiché a questo scopo non sono sufficienti sistemi che adottano una camera singola o geometrie planari, è stato necessario sviluppare una piattaforma che comprendesse anche geometrie extraplanari. La necessità di mantenere una relazione anche con i precedenti sistemi complanari, tuttavia, ha dettato l'esigenza di apportare miglioramenti di natura incrementale all'architettura esistente, piuttosto che scegliere un approccio radicale. Inoltre, gli aspetti pratici dei dispositivi di misurazione portatili, come ad esempio il tempo limitato a disposizione per la misurazione, la stabilità della piattaforma, e così via, non hanno consentito l'adozione di soluzioni più robuste, come ad esempio la scansione attraverso spettrofotometri goniometrici. Abbiamo tenuto presente gli aspetti legati ai costi e ai tempi/stabilità di misurazione per effettuare esperimenti necessari a determinare il numero minimo di angoli di campionamento extraplanare per ottenere l'obiettivo di fornire informazioni direttamente correlate al processo e alla formulazione. La progettazione degli esperimenti è stata condotta tenendo presente diverse varianti di pannelli pressofusi attraverso un processo di iniezione termoplastica, con diversi processi e formulazioni. I pannelli sono stati creati e misurati utilizzando uno spettrofotometro goniometrico a scansione. I risultati sono stati analizzati, e ad essi sono stati adattati dei lobi matematici. Da questo abbiamo determinato la geometria di campionamento della nostra piattaforma hardware. Oltre alla tradizionale geometria a 5 angoli complanari, abbiamo aggiunto due ulteriori angoli di campionamento complanari e quattro angoli extraplanari. Per aumentare ulteriormente la densità e la robustezza dei



dati, abbiamo poi aggiunto un secondo illuminatore, in tal modo raddoppiando a tutti gli effetti i risultati di misurazione, senza raddoppiare i costi o la complessità. Vedi Figura 3.

Basandosi sulle descrizioni sopra fornite, abbiamo fabbricato alcuni sistemi, e ripetuto gli esperimenti su un numero maggiore di campioni, utilizzando più variazioni di formulazioni e di processo, con incrementi più fini.

I dati grezzi sono stati elaborati attraverso la nostra metodologia a somma vettoriale dello spettro. Questo metodo è coerente con i principi della teoria del mezzo efficace, e consente di sintetizzare dati spettrali multi-angolo con una rappresentazione spettrale a due o tre dimensioni. Il metodo prevede una somma vettoriale pesata delle direzioni di misurazione, con pesi scelti secondo i fattori di riflettanza per ciascuna direzione considerata. Il risultato di tale somma è uno spettro di punti in uno spazio 3D, un punto per ciascuna lunghezza d'onda misurata.

La somma vettoriale pesata viene inoltre scalata sulla lunghezza della somma vettoriale di un riflettore lambertiano bianco ideale, allo scopo di rendere i valori confrontabili con valori di riflettanza tipici. Il sistema di coordinate dei risultati è composto dalla direzione speculare (asse z), della proiezione della direzione di illuminazione ortogonale alla direzione speculare (asse y), ed il prodotto vettoriale di queste due direzioni (asse x). A questi risultati abbiamo assegnato la denominazione di spettro xDNA.

xDNA è una somma vettoriale pesata delle direzioni di misurazione, scalate sulla riflettanza in ciascuna delle direzioni, e con pesi scelti per ciascuna direzione considerata. I pesi, opzionali, possono essere usati per vincolare la somma vettoriale su certe direzioni, per enfatizzarle, o per adattare il risultato all'energia presente in ciascuna direzione. Tutti i dati presentati in questo articolo utilizzano un singolo illuminatore (quello tradizionale a 45 gradi), ed i 10 canali diffusivi (non speculari).

L'effetto delle impostazioni delle apparecchiature è, naturalmente, specifico per ciascuna particolare apparecchiatura. Per questo motivo, anche se due campioni hanno spettri xDNA con la stessa forma, e pertanto possono essere classificati come diversi dal punto di vista del processo, non esiste un criterio puramente ottico che consenta di valutare se tale differenza è dovuta ad impostazioni diverse sulla stessa apparecchiatura, all'uso di diverse apparecchiature di applicazione, ad additivi che hanno modificato l'orientamento dei flake, a differenze di umidità, oppure ancora ad altre condizioni che influiscono sul processo di applicazione. Per determinare l'equivalenza delle forme degli spettri xDNA, si utilizzano operazioni lineari di traslazione, rotazione, e scalatura. Tutte le operazioni di trasformazione sono effettuate in relazione ad uno standard. Il vettore di traslazione, la matrice di rotazione, ed il fattore di scala, sono calcolati insieme, utilizzando l'algoritmo Procrustes per calcolare una trasformazione ai minimi quadrati dello spettro xDNA del campione trasformato nello spettro xDNA standard. Per poter

effettuare il confronto con lo standard, i risultati intermedi delle operazioni di traslazione e rotazione sono inoltre centrati per traslazione sul centro dello standard.

Rotazione

La rotazione xDNA dello spettro traslato viene indicata con xDNA_a. La rotazione è tipicamente una caratteristica che è accoppiata sia a variazioni di processo che nella distribuzione della ricetta. Per esempio, in un processo di pressofusione, la rotazione è dovuta ad una variazione nel processo che dà come risultato una diversa distribuzione del peso molecolare nella dimensione delle particelle in una ricetta, oppure una variazione di dimensione e/o orientamento delle particelle dovuta a queste variazioni.

Non è sempre ovvio quale tra i valori dello spettro allineato xDNA_a o dello spettro scalato xDNAs sia più significativo nel rappresentare differenze di formulazione. In alcune situazioni, due campioni che differiscono solo per le condizioni del processo presentano differenze significative nei loro spettri allineati xDNA_a, pertanto è necessario esaminare gli spettri scalati xDNAs per determinare se la differenza tra campioni è una differenza effettivamente dovuta al processo, e non una differenza di formulazione. D'altra parte, non sono infrequenti casi in cui si ha un valore xDNAs molto piccolo per campioni con differenze di formulazione rilevanti, per esempio nei grigi diffusivi.

Continuando con l'analogia biologica, si può pensare alla relazione tra lo spettro xDNA non trasformato, e lo spettro xDNAs scalato come simile alla relazione tra il fenotipo ed il genotipo di un essere vivente. Proprio come il fenotipo di un organismo vivente non è il risultato solamente della sua struttura genetica, ma anche dell'interazione con l'ambiente in cui vive, l'xDNA di una superficie è il risultato sia del materiale sottostante, caratterizzato dal valore di xDNAs, e della sua interazione con l'ambiente, rappresentato dalle condizioni del processo applicativo. Quando si considerano le trasformazioni xDNA, occorre tenere presente sia gli spettri trasformati, che i parametri utilizzati per la trasformazione. Non esiste un valore solo che possa catturare tutte le informazioni di interesse in situazioni come queste. Tenere presente che la ragione per cui si utilizzano indici o altri valori singoli come la formula di differenza colore, è che la loro semplicità e la quantità di informazioni che forniscono compensano le informazioni che si perdono quando si considera il valore singolo.

Distinguiamo tra formule di differenza che generalizzano le funzioni colorimetriche, e formule di differenza rispetto ai dati delle coordinate xDNA. Vanno inoltre considerate le formule che utilizzano direttamente i dati di riflettanza, e le applicazioni di tutte queste formule a dati xDNA trasformati spazialmente.

La formula DF

Esattamente come si derivano dati colorimetrici dai dati spettrali utilizzando funzioni di pesatura dell'illuminante e dell'osservatore, funzioni CIELAB, DE, DE₉₄, DE₂₀₀₀ ed altre funzioni di pesatura, è possibile derivare dati colorimetrici dagli spettri 3D xDNA. Tra i possibili approcci per generalizzare le formule di differenza colore agli spettri a più dimensioni, vi sono i seguenti:



1. Calcolare i dati colorimetrici quali XYZ, LAB, e formule di differenza su ciascuno dei piani x, y, e z. Combinare le formule di differenza calcolate sui diversi piani come la radice quadrata della somma dei quadrati delle formule di differenza dei singoli piani.
2. Calcolare i dati XYZ su ciascuno dei piani x, y e z. Utilizzare questi valori come componenti x, y, e z di vettori dati valorizzati X, Y, e Z, e calcolare la norma dei vettori tridimensionali X, Y, e Z. Calcolare ora L, a, b, e i dati di differenza colore utilizzando le norme monodimensionali di X, Y, e Z.

Utilizziamo la notazione DF per la formula di differenza colore calcolata generalizzato il normale Delta E usando l'approccio 1. La curva xDNA può essere la curva xDNA base, oppure una delle curve trasformate xDNA_t, xDNA_a, o xDNA_s. Utilizziamo poi DF_t, DF_a e DF_s come risultati del calcolo di DF sulle curve trasformate.

Poiché le funzioni colorimetriche sono state costruite per approssimare la percezione dell'occhio umano delle differenze colore, DF non è necessariamente la formula di differenza ottimale da applicare agli spettri trasformati xDNA, quali xDNA_t, xDNA_a, e xDNA_s. Inoltre, gli approcci sopra descritti per generalizzare la formula di differenza funzionano sia su spettri trasformati e che su xDNA non trasformati.

Discussione si dati e sui risultati

Nel seguito, presentiamo una serie di esempi di complessità crescente. I risultati mostrati di seguito utilizzano un illuminatore singolo (con angolo di incidenza a 45 gradi), ed i 10 angoli non speculari come mostrato in figura 3. Poiché xDNA fondamentalmente rappresenta la polarizzazione dell'energia, cominceremo presentando un campione che praticamente non presenta polarizzazione.

Spectralon™

Lo Spectralon è un materiale bianco diffusivo, che presenta una BRDF sostanzialmente emisferica. La sua riflettanza è pari al 99,1% sullo spettro del visibile, e diffusiva per tutti gli angoli. Poiché la BRDF è uniforme in tutte le direzioni per tutte le lunghezze d'onda, i vettori saranno tutti uguali. In questo caso, tutti i 31 risultati di lunghezza d'onda si presenteranno uno sull'altro. Le figure 4a e 4b mostrano i risultati. In questi tracciati (e i successivi) l'asse z è mostrato in verticale, y è orizzontale, e x è orientato come entrante nella carta. Ricordare che l'asse z corrisponde alla direzione speculare, y alla direzione di illuminazione, e x è uscente dal lato dello strumento. Osservare che la Figura 4b presenta lo stesso risultato della 4a, ma con l'asse tracciato con una scala diversa. Le piccole differenze presentate in figura 4b sono il risultato del processo di sabbatura ad acqua dello Spectralon. La Figura 4c mostra il risultato dell'aggiunta di pigmento Nero a Spectralon con riflettanze di campione risultanti del 99,1, 80, 60, 40, 20, 10, 5 e 2%.

Campioni ceramici

Le figure 5a e 5b mostrano i risultati di una serie di misurazioni effettuate su una serie di campioni ceramici su scala di grigi.

I valori di riflettanza comprendono rispettivamente 1%, 3,5, 15, 32, 50, e 88% Osservare nel grafico b la polarizzazione per ciascuna lunghezza d'onda dovuta al sottile strato lucido presente sulla piastrella del campione. Questo aspetto è assente nei campioni di Spectralon.

Piastrelle BCRA Rosso e Verde

La Figura 6 mostra i campioni BCRA Rosso e Verde. La Figura 6a mostra l'xDNA del Rosso. La Figura 6b mostra le riflettanze spettrali grezze del Rosso. Osservare anche qui la polarizzazione fuori piano da sinistra a destra. Tuttavia, rispetto all'uso delle piastrelle bianche, qui non è presente una oscillazione sulle lunghezze d'onda. Le Figure 6c e d sono rispettivamente per il campione verde. In questo caso, la polarizzazione extraplanare forma un anello, anche se su una scala piccola delle x.

Tinte Organiche BASF su campioni in polipropilene

La Figura 7 mostra una serie di diverse formulazioni di polipropilene con pigmento organico 100%, pigmento organico 99,5% pigmento nero 0,5%, pigmento organico 30% con 70% Bianco, Organico 15% Bianco 85%, Organico 8% con Bianco 92%, e Organico 2% e bianco 98%. Le tinte organiche comprendono Violet K5011, Blue K6330, Green K9360, Yellow K0961 HD, e Red K3911 HD

Campioni

La Figura 8 mostra le tinte organiche BASF nello spettro incrociato a concentrazione piena nello spazio xDNA.

Campioni

La Figura 9 mostra visualizzazioni dello spazio xDNA tracciato sulla tramatura della superficie

Campioni

La Figura 10 mostra la formulazione Scala di Grigi con le medesime concentrazioni ma utilizzando pigmenti Bianco e Nero.

Conclusioni

Abbiamo presentato una innovativa combinazione dell'applicazione di un approccio BRDF spaziale sottocampionato (comprendente geometrie extra-planari), e di un semplice modello fenomenologico in grado di catturare sia i contributi della formulazione a livello di nanoscala e microscala, che i contributi legati al processo applicativo, nel determinare l'aspetto complessivo del prodotto. Sono stati presentati aspetti legati a geometrie di campionamento spettrofotometrico consigliate, oltre ad esempi di formulazione, variazioni di distribuzione tra lotti, variazioni di processi, e separabilità dei contribuenti. Abbiamo presentato un metodo chiamato xDNA, e metriche derivate da esso, per ridurre la dimensionalità dei dati, mantenendo nel contempo le relazioni goniometriche più importanti tra gli effetti percettivi quali la ruvidità e la brillantezza, e le differenze di processo e di formulazione.

Sviluppi futuri

Continueremo ad effettuare ricerche e sviluppare versioni più robuste del sistema portatile di misurazione e comunicazione dei parametri di aspetto. I nostri passi successivi considereranno misurazioni distribuite spazialmente, ulteriori rappresentazioni del modello, e strumenti di comunicazione.

Bibliografia

QED: The Strange Theory of Light and Matter, Richard P. Feynman, Princeton Science Library, 1971

Zur Elektrodynamik Bewegter Körper, Albert Einstein, Annalen der Physik, 17, 1905

Multiple Scattering Processes, Harriet Kagiwada, Addison-Wesley Publishing, 1975

Farbenphysik Fur Industrielle Anwendungen, Georg A. Klein, Springer Verlag, 2004

Light and Matter, Yehuda B. Band, Wiley, 2006

Radiative Transfer, Chandrasekhar, Oxford University Press, 1960

A novel technique for analysis of electromagnetic scattering from microstrip antennas of arbitrary shape, Uckun, S.; Sarkar, T.K.; Rao, S.M.; Salazar-Palma, M., IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 45, Issue 4, Apr. 1997 Page(s): 485-491

A vector inverse algorithm for electromagnetic scattering, Borden, B.; U.S. Naval Weapons Center, China Lake, CA SIAM Journal on Applied Mathematics (ISSN 0036-1399), vol. 44, June 1984, p. 618-626. 1984

Electromagnetic Scattering by a System of Dielectric Spheres Coated With a Dielectric Shell, Hamid, A. K.; Hussein, Mousa I.; Hamid, Michael, University of South Alabama, Mobile, Nov. 2003

Fast analysis of electromagnetic scattering from finite strip gratings on a grounded dielectric slab, Valero, Alejandro; Rojas, Roberto G., Radio Science, Volume 35, Issue 6, p. 1307-1314 (RaSc. Homepage), 2000

A Numerical Solution for Electromagnetic Scattering from Large Faceted Conducting Bodies by Using Physical Optics-SVD Derived Bases, Gianluigi Tiberi, Agostino Monorchio, Giuliano Manara and Raj Mittra, IEICE Transactions on Electronics, Vol E90-C, Number 2, pg 252-257, 2006

Finite Elements for Wave Electromagnetics, P.P. Silvester, G. Pelosi, IEEE Press: New York, 1994. ISBN 0-7803-1040-3. ix+534 pp.

Illustrazioni, tabelle e figure

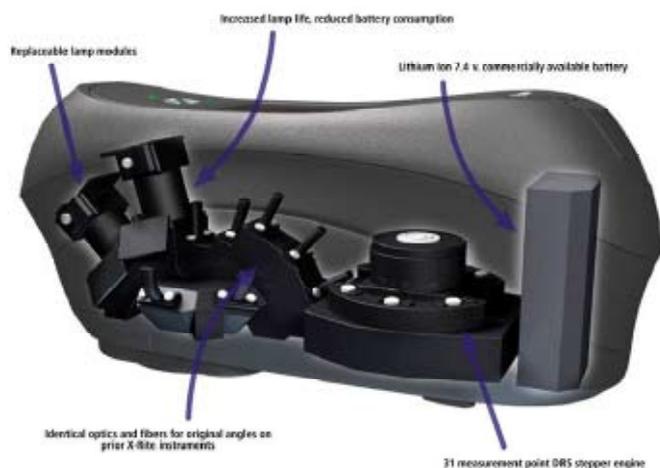


Figura 1. MA98 multi-angolo – spettrofotometro goniometrico extraplanare

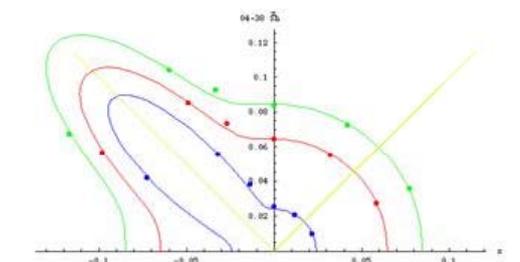
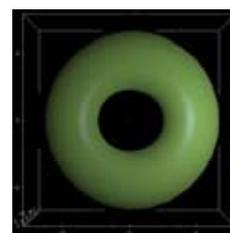


Figura 2. Modello BRDF adattato a misurazione multi-angolo e a corrispondente resa di superficie

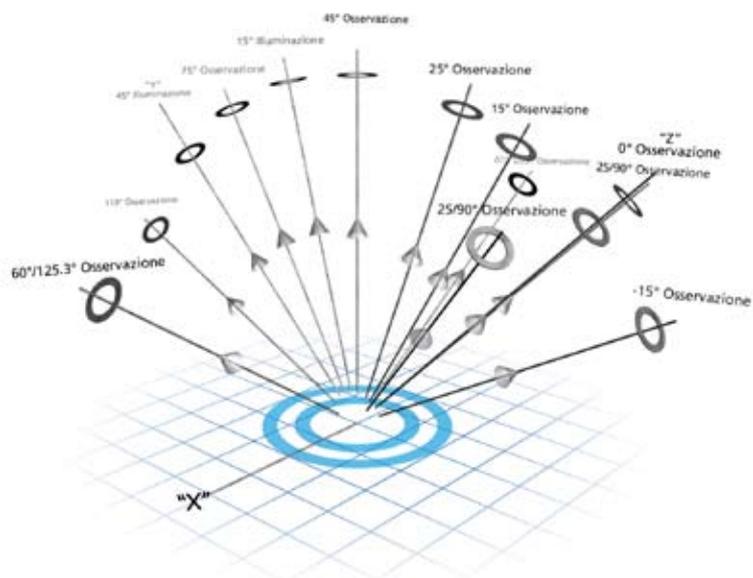


Figura 3. Geometrie e viste MA98

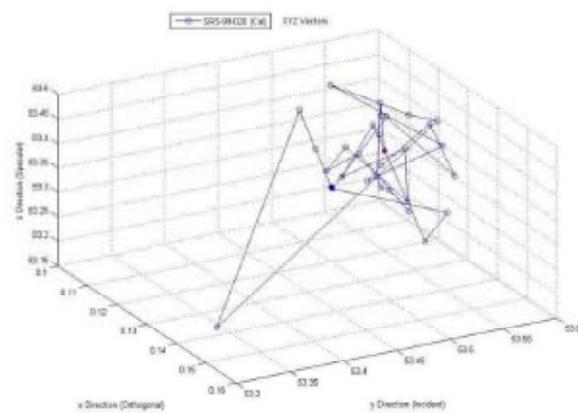
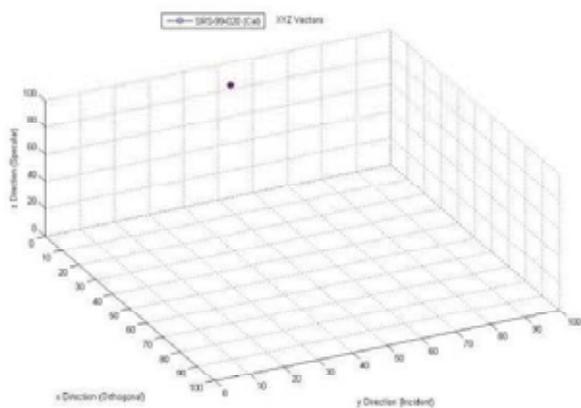
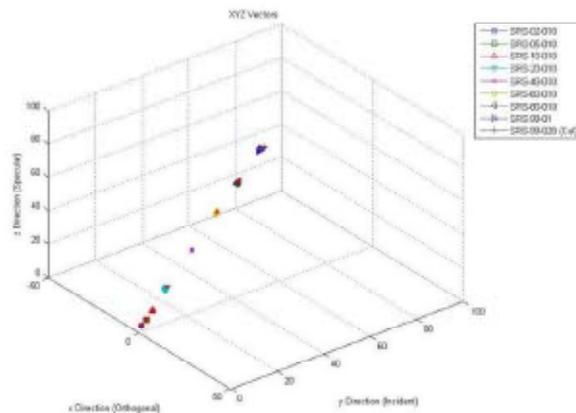
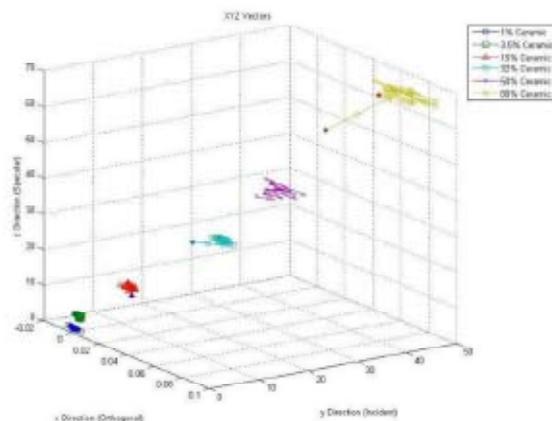
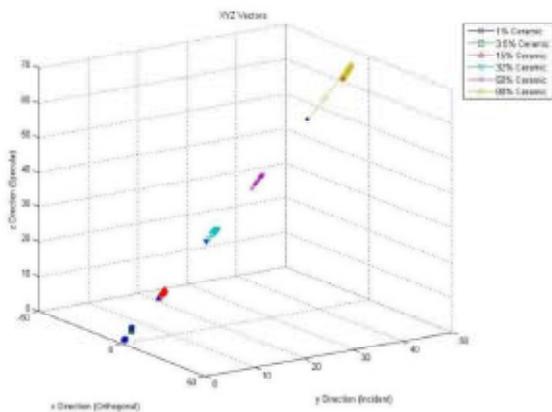
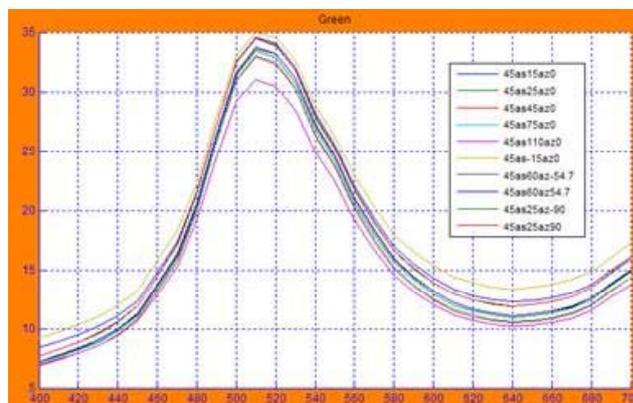
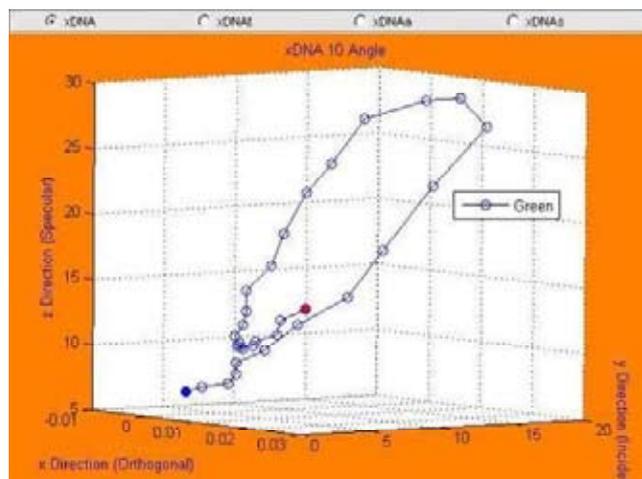
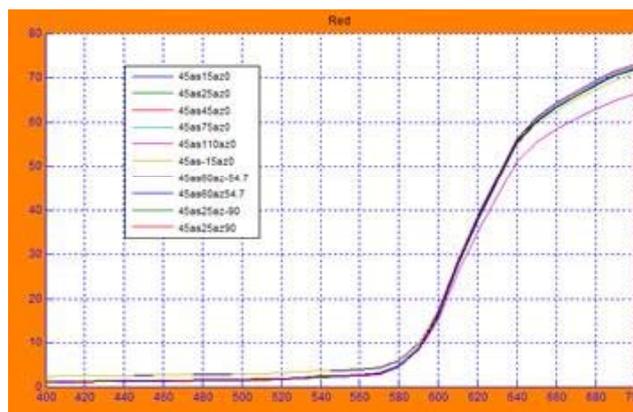
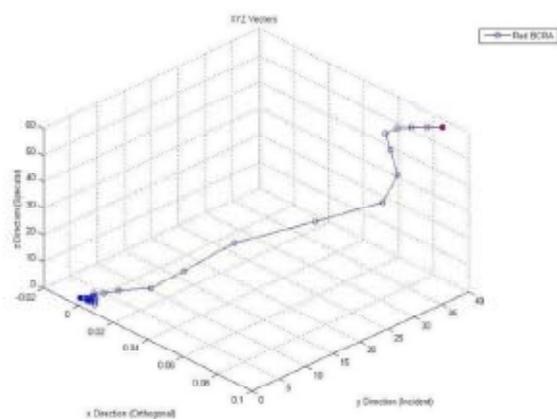


Figure 4a. e 4b. Risultati Spectralon. La Figura 4c mostra pigmento Nero aggiunto a Spectralon con riflettanze di campione risultanti di 99,1, 80, 60, 40, 20, 10, 5 e 2%.

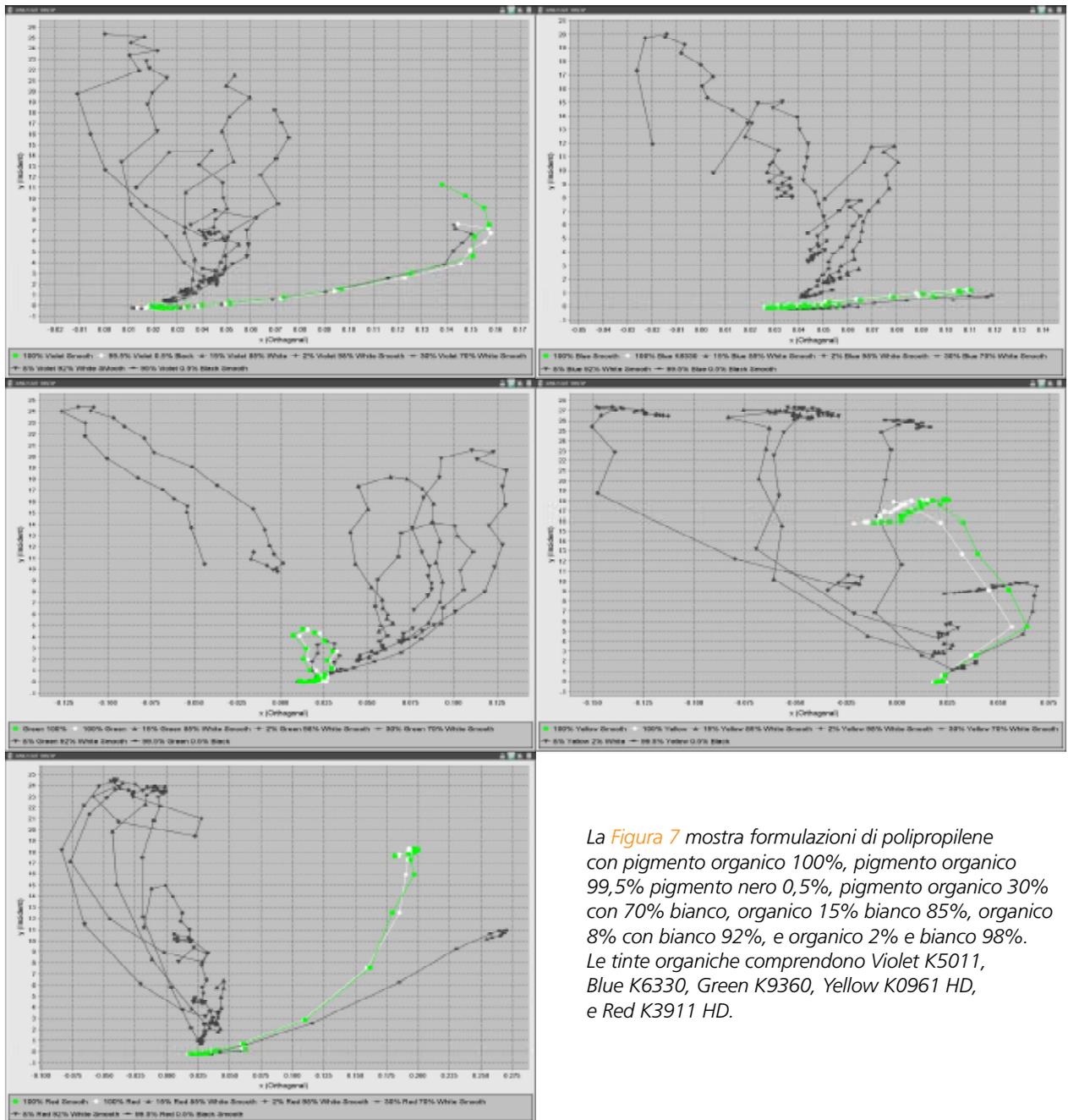




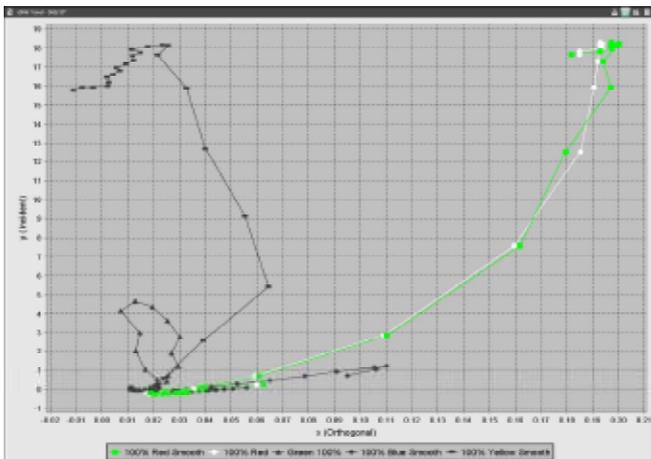
Le Figure 5a. e 5b. mostrano i risultati di una serie di misurazioni effettuate su una serie di campioni ceramici in scala di grigio. I valori di riflettanza sono rispettivamente 1%, 3,5, 15, 32, 50, e 88%



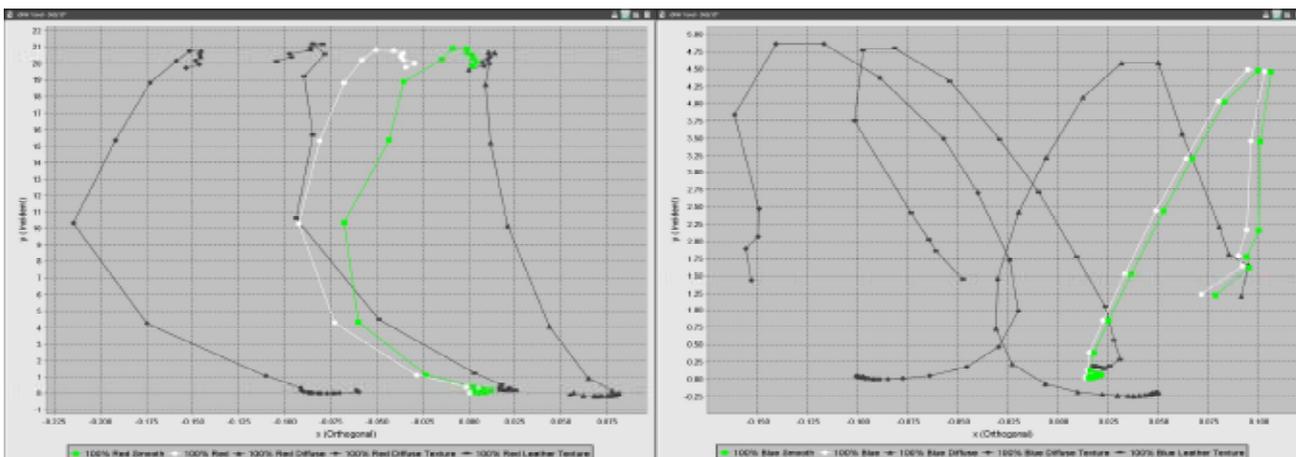
La Figura 6 mostra i campioni BCRA Rosso e Verde. La Figure 6a mostra l'xDNA Rosso. La Figure 6b mostra le riflettanze spettrali grezze del Rosso. Le Figure 9c e d sono rispettivamente per il campione verde.



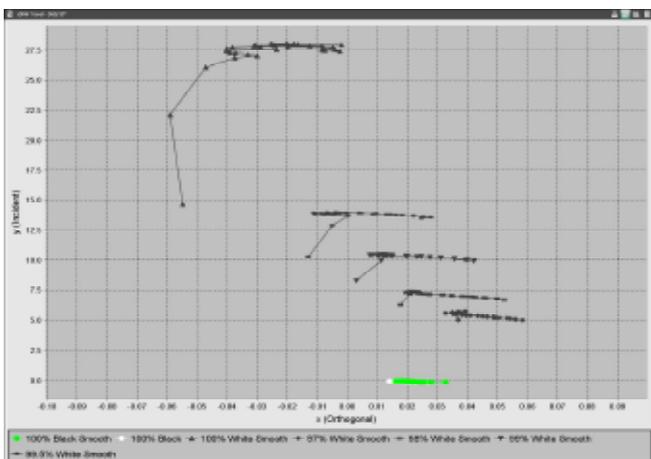
La Figura 7 mostra formulazioni di polipropilene con pigmento organico 100%, pigmento organico 99,5% pigmento nero 0,5%, pigmento organico 30% con 70% bianco, organico 15% bianco 85%, organico 8% con bianco 92%, e organico 2% e bianco 98%. Le tinte organiche comprendono Violet K5011, Blue K6330, Green K9360, Yellow K0961 HD, e Red K3911 HD.



La Figura 8 mostra le tinte organiche BASF nello spettro incrociato a concentrazione piena nello spazio xDNA.



La Figura 9 mostra visualizzazioni dello spazio xDNA tracciate sulla tramatura della superficie.



La Figura 10 mostra la formulazione Scala di Grigi con le medesime concentrazioni ma utilizzando pigmenti Bianco e Nero.

