



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Verso un indice di resa cromatica basato su un modello più efficace del
sistema visivo

A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Fumagalli, G. Leonardi



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO

VERSO UN INDICE DI RESA CROMATICA BASATO SU UN MODELLI PIU' EFFICACE DEL SISTEMA VISIVO

Alessandro Rizzi, Cristian Bonanomi (Dipartimento di Informatica, Università degli Studi di Milano)
Simonetta Fumagalli, Giuseppe Leonardi (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Innovazione nella illuminazione pubblica: nuove tecnologie ed integrazione smart con altre reti di servizi energetici

Responsabile del Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

Si ringraziano Philips e Osram per i campioni di sorgenti.

Si ringrazia l'ISIS E. Stein di Gavirate: la Preside, gli Insegnanti, il Personale di Laboratorio, il Personale non docente e gli Studenti (classi 3° geometri, 1° B liceo scientifico, 2° B liceo scientifico, 3° D liceo scientifico - anno scolastico 2011-2012) per l'interesse, l'entusiasmo, la gentilezza e la disponibilità che hanno reso possibile l'attività sperimentale a scuola.

Indice

Sommario	5
Introduzione.....	6
1. L'indice di resa cromatica.....	7
2. Indici di resa cromatica alternativi.....	8
2.1 Modelli di apparenza colore (CAM)	9
2.2 Color Quality Scale (CQS).....	10
2.3 Metodo CRI R96a.....	11
2.4 Metodo CRI00.....	12
2.5 Color Harmony Index.....	12
2.6 Approccio basato su oggetti/sulla memoria	13
2.7 Metodo di Da Pos	14
2.8 Indice di resa cromatica basato sui nomi categorici dei colori	15
2.9 Indice di resa cromatica CRI-CAM02 UCS	16
2.10 Gamut Area Index.....	17
2.11 Metodo di Oleari.....	18
2.12 Rank order Color Rendering Index (RCRI)	18
2.13 Metodo di Monte Carlo	20
2.14 Metodo di Hashimoto.....	20
3. Apparenza, contrasto e dinamica	21
3.1 Misure di contrasto globale.....	22
3.2 Peli (1990).....	22
3.3 Ahumada (1996).....	23
3.4 Tadmor e Tolhurst (1998)	23
3.5 Reinagel e Zador (1999)	25
3.6 Rizzi et al. (2004) (RAMM).....	25
3.7 Simone et al. (2012).....	26
3.8 Contrasto e dinamica della luce	27
3.9 Una sperimentazione per il calcolo del CRI: Eido Index v2.....	34
4. Un primo esperimento sulla resa visiva di sorgenti di luce	35
4.1 Introduzione	35

4.2 Sorgenti di luce	36
4.2 Descrizione dell'esperimento.....	37
5. Un secondo esperimento sulla resa visiva di sorgenti di luce	40
5.1 Introduzione	40
5.2 Set-up degli esperimenti.....	40
5.3 Il primo esperimento (Macbeth Color Checker).....	43
5.4 Il secondo esperimento (LEGO™).....	44
5.5 Il questionario.....	44
5.6 Statistiche dei risultati.....	45
5.7 Risultati del primo esperimento	46
5.8 Risultati del secondo esperimento.....	51
Conclusioni	55
Riferimenti bibliografici	55
Bibliografia estesa	58
Curriculum scientifico del gruppo di lavoro	63

Sommario

In questo rapporto viene descritto il lavoro svolto durante l'anno di progetto appena terminato, riguardante l'analisi, lo studio e lo sviluppo di nuovi approcci legati al color rendering index, o indice di resa cromatica.

Il color rendering index (CRI) è una misura di quanto una sorgente luminosa preserva l'apparenza cromatica degli oggetti osservati sotto di essa.

Negli ultimi anni il CRI, o meglio il metodo per valutare la bontà di una certa illuminante, è tornato materia di studio, in quanto i nuovi sistemi di illuminazione, in particolare quelli basati su tecnologia LED, possono avere una piacevole resa cromatica ma un indice CRI piuttosto basso. Da ciò segue che il vecchio indice CRI ha diminuito la sua affidabilità su un intero segmento di mercato.

Il calcolo del CRI si basa unicamente sulla distribuzione spettrale di potenza della sorgente di luce e non tiene conto di fattori spaziali, essenziali per determinare la resa visiva di una scena. Infine, altro problema del CRI è il tentativo di esprimere in un solo numero tutte le caratteristiche della sorgente di luce in esame.

In questo progetto si sono studiati ed analizzati l'indice di resa cromatica standard, così come un insieme di indici più recenti sviluppati con lo scopo di migliorare quello esistente, misure per il calcolo del contrasto percepito di una immagine, a partire da misure globali, fino a più utili misure locali, esperimenti percettivi con utenti, tesi a verificare sperimentalmente la resa visiva di diverse sorgenti di luce e di vari CRI, col tentativo di proporre un protocollo pratico di misura del CRI sul campo e non a priori mediante una formula.

Per offrire una trattazione organica ed evitare continui rimandi a documenti esterni, sono riportate qui anche alcune parti già presentate nei report tecnici della precedente annualità: queste parti saranno evidenziate con apposite note a piè pagina.

Introduzione

Il color rendering index (CRI) è una misura di quanto una sorgente luminosa preserva l'apparenza cromatica degli oggetti osservati sotto di essa. Per molti anni la ricerca e l'industria hanno utilizzato una formula per il calcolo di questo indice messa a punto nel 1965. Vi era accordo nel sostenere che questa formula non fosse perfetta, ma per molti anni ha svolto con relativo successo una funzione molto importante.

Questo fino all'avvento delle nuove tecnologie di illuminazione a LED.

Negli ultimi anni il CRI, o meglio il metodo per valutare la bontà di una certa illuminante, è tornato materia di studio, la ragione è che i nuovi sistemi di illuminazione possono avere una buona resa cromatica ma un indice CRI piuttosto basso. Questo fatto ha portato a riconsiderare i principi alla base del CRI classico, il cui calcolo si basa unicamente sulla distribuzione spettrale di potenza della sorgente di luce, senza tener conto di fattori spaziali, essenziali per determinare la resa visiva di una scena. Inoltre il modello del sistema visivo utilizzato è una semplice trasformazione di adattamento cromatico, metodo un po' troppo semplificato per poter descrivere un sistema così complesso come il nostro sistema visivo. Infine, problema del CRI è il tentativo di esprimere in un solo numero tutte le caratteristiche della sorgente di luce in esame.

Partendo dalla descrizione di questi limiti, il lavoro descritto in questo rapporto si è mosso in tre direzioni.

La prima riguarda lo studio e l'analisi dei metodi alternativi di calcolo dell'indice di resa cromatica che sono stati sviluppati a seguire dall'uscita del CRI originale, soprattutto recentemente. Tale stato dell'arte ragionato è stato poi ulteriormente ampliato nella bibliografia espansa.

La seconda direzione di ricerca riguarda il tentativo di utilizzare modelli un po' più complessi del sistema visivo. L'idea base è quella che ciò che conta per il calcolo del CRI non è solo la distribuzione spettrale dell'illuminante, ma anche la qualità della luce e le caratteristiche visive della scena illuminata. Per questa ragione siamo partiti dall'analisi dello stato dell'arte per la misura del contrasto percepito, misura collegata sia alla percezione visiva che alla distribuzione della luce nella scena. Sono stati fatti alcuni tentativi preliminari di collegare la misura del CRI con modelli spaziali della percezione ed altri seguiranno.

La terza direzione di ricerca ha voluto verificare di quanto il calcolo del CRI classico e di altri CRI alternativi sottostimassero la reale capacità dell'illuminante di riportare la corretta apparenza cromatica. A tale scopo abbiamo svolto dei test con utenti, con l'intenzione ulteriore di sviluppare un protocollo più generale per la verifica sperimentale del CRI. L'approccio iniziale che testava l'apparenza di color checker piani e non lucidi è stata subito arricchita con l'uso nel test di oggetti reali tridimensionali con moderate specularità ed inoltre di configurazioni metameriche, argomento raramente considerato nelle attività sperimentali sul CRI.

Tale lavoro ha dato luogo, oltre a questo rapporto, ad una pubblicazione a conferenza internazionale già accettata:

Simonetta Fumagalli, Cristian Bonanomi, Alessandro Rizzi, "An experiment on the color rendering of different light sources", Color Imaging XVIII: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications, IS&T-SPIE Electronic Imaging, 3 - 7 February 2013, San Francisco (USA)

e ad altre pubblicazioni in preparazione che verranno inviate rispettivamente a:

- Journal of Optical Society of America A
- Conferenza CIE per il centenario "Towards a new century of light", 15-16 Aprile 2013, Parigi

Il rapporto è così organizzato. Nel capitolo 1 viene descritto l'indice di resa cromatica standard, così come un insieme di indici più recenti sviluppati con lo scopo di migliorare quello esistente (capitolo 2).

Nel capitolo 3 sono presentate le principali misure per calcolare il contrasto di una immagine. I capitoli 4 e 5 presentano gli esperimenti percettivi condotti.

1. L'indice di resa cromatica

¹Secondo la definizione della CIE l'indice di resa cromatica misura: "Effect of an illuminant on the color appearance of objects by conscious or subconscious comparison with their color appearance under a reference illuminant." [1].

Dalla definizione emerge che il calcolo del CRI necessita di un illuminante di riferimento, la quale racchiude in sé l'idea di sorgente di luce a noi familiare.

Viene delineata di seguito la procedura per calcolare il CRI standard [2] (la misura è talvolta denotata con la sigla R_a).

A partire dallo spettro di emissione della sorgente test, di cui si vuole calcolare il CRI, si determina la temperatura colore correlata (CCT). A seconda che la CCT sia minore o maggiore/uguale di 5000 K, lo spettro dell'illuminante di riferimento viene calcolato come radiazione del corpo nero o illuminante della serie D (dove D sta per Daylight) a quella data temperatura.

In maniera opzionale è possibile a questo punto eseguire un adattamento cromatico con lo scopo di aggiustare la cromaticità della sorgente di luce test rispetto all'illuminante di riferimento.

Il prossimo passo consiste nel calcolare i valori di tristimolo di 8 (o 14, a seconda che si voglia calcolare il CRI standard o una sua estensione, si veda figura 1) campioni di colore osservati sotto entrambe le sorgenti di luce. Infine si calcolano le differenze ΔE_i tra i valori di tristimolo di campioni corrispondenti, osservati sotto la luce test e la luce di riferimento. A partire dal valore 100 viene sottratta la differenza trovata, per ogni singolo campione, ed infine viene calcolata la media. In pratica se i campioni di colore osservati sotto le due sorgenti di luce sono molto simili, le differenze saranno minime ed il CRI calcolato sarà prossimo a 100, indicando un'ottima resa visiva.

¹ vedi anche i report tecnici del PAR2008-2009

Name	Appr. Munsell	Appearance under daylight	Swatch
TCS01	7,5 R 6/4	Light greyish red	
TCS02	5 Y 6/4	Dark greyish yellow	
TCS03	5 GY 6/8	Strong yellow green	
TCS04	2,5 G 6/6	Moderate yellowish green	
TCS05	10 BG 6/4	Light bluish green	
TCS06	5 PB 6/8	Light blue	
TCS07	2,5 P 6/8	Light violet	
TCS08	10 P 6/8	Light reddish purple	
TCS09	4,5 R 4/13	Strong red	
TCS10	5 Y 8/10	Strong yellow	
TCS11	4,5 G 5/8	Strong green	
TCS12	3 PB 3/11	Strong blue	
TCS13	5 YR 8/4	Light yellowish pink	
TCS14	5 GY 4/4	Moderate olive green (leaf)	

Figura 1: campioni usati nel calcolo del CRI standard (base ed estensione), e simulazione grafica. Immagine presa da Wikipedia.

Formula per il calcolo dell'indice di resa cromatica per la singola patch i-esima:

$$R_i = 100 - 4.6 * \Delta E_i$$

Indice di resa cromatico totale calcolato come media sugli 8 campioni standard:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

2. Indici di resa cromatica alternativi

Recentemente diversi ricercatori hanno evidenziato i limiti ed i punti deboli del CRI dimostrando che tale indice non è adatto a stimare la resa visiva tipica di sorgenti luminose a banda stretta, come ad esempio alcuni tipi di lampade fluorescenti o di led bianchi [3]. Questo proprio perché il metodo si basa su campioni di colore discreti e quindi, se la sorgente emette energia prevalentemente in lunghezze d'onda che non 'coprono' i colori campione, anche se con spostamenti molto piccoli, queste lunghezze d'onda non danno alcun contributo per la valutazione della resa cromatica. Di seguito verranno delineati alcuni dei metodi alternativi più significativi per il calcolo dell'indice di resa cromatica. Alcuni di essi sono modifiche o miglioramenti dell'indice base, altri invece si basano su approcci totalmente diversi. Prima di descrivere i nuovi indici tuttavia, è utile esporre le linee guida dei modelli di apparenza colore, poiché questi si ritrovano in alcuni dei metodi proposti.

2.1 Modelli di apparenza colore (CAM)

Per calcolare alcuni degli indici di resa cromatica più recenti si fa uso di modelli di apparenza cromatica o trasformazioni di adattamento cromatico. Nel seguito delineiamo i principi di funzionamento di tali modelli. La necessità di un modello di apparenza cromatica nasce dal fatto che due stimoli identici visti in condizioni di illuminazione o contesti particolari possono *apparire* diversi. Molti fattori possono avere un qualche effetto sull'apparenza di uno stimolo, tra questi di sicuro le condizioni di illuminazione giocano un ruolo fondamentale.

I modelli di adattamento cromatico richiedono quindi che vengano specificati le condizioni del contesto in cui è visto (per cui lo sfondo (background) e anche il livello di illuminazione ambientale (surround), oltre talvolta un'area che circonda lo stimolo stesso (proximal field), anche se spesso questa viene considerata background). Queste zone sono visibili in figura 2.

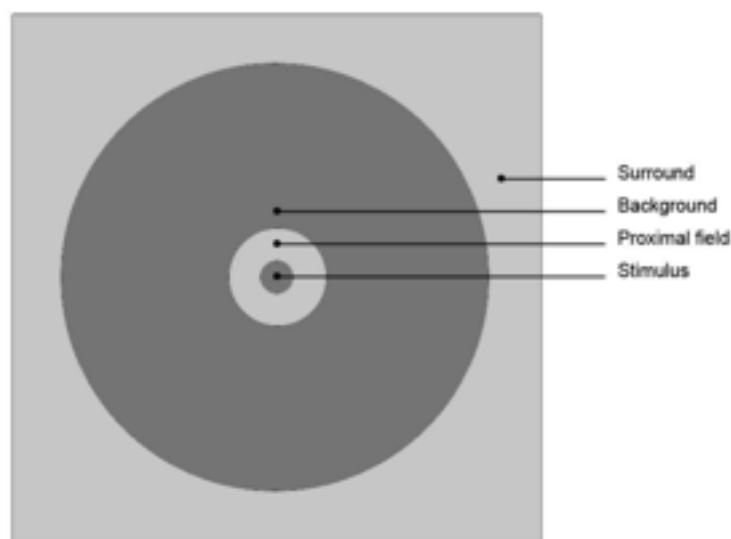


Figura 2: le quattro componenti del contesto in cui si osserva uno stimolo.

Un'interessante proprietà del sistema visivo umano è quella di percepire i colori degli oggetti in maniera stabile anche in caso di un cambiamento delle condizioni di illuminazione. Questa abilità viene chiamata *costanza del colore* (o *costanza cromatica*), e una possibile spiegazione a questa attitudine è il cosiddetto adattamento cromatico, cioè un aggiustamento del sistema visivo con lo scopo di mantenere pressoché costante il colore degli oggetti al variare dell'illuminazione. A partire dagli anni 50 [4-12] sono stati svolti una serie di esperimenti con lo scopo di generare alcuni dati, che prendono il nome di *colori-corrispondenti*.

La definizione è semplice: quando due stimoli differenti osservati sotto condizioni di vista differenti corrispondono, si ha una coppia di colori-corrispondenti (figura 3).

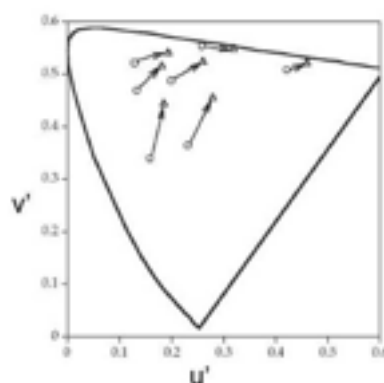


Figura 3: esempio di colori corrispondenti sul diagramma u'v': i cerchi rappresentano i colori osservati sotto una illuminante D65, i triangoli rappresentano i colori corrispondenti osservati sotto una illuminante di tipo A.

Il primo passo per costruire un modello di apparenza colore è la trasformazione di adattamento cromatico (CAT). Una CAT è in grado di trasformare i valori di tristimolo (XYZ) osservati in certe condizioni di osservazione iniziali in valori di tristimolo di un colore corrispondente osservato in altre condizioni di illuminazione. In pratica una CAT è una trasformazione in grado di predire coppie di colori corrispondenti. Esistono varie CAT, tra questa c'è la CAT02, usata in alcuni degli indici proposti di seguito (ad esempio nel Color Quality Scale e nel CRI-CAM02 UCS). Un modello di apparenza colore deve necessariamente includere un qualche tipo di CAT, inoltre deve essere in grado di predire alcuni attributi percettivi del colore come la chiarezza, la croma, la tinta. Famosi ed utilizzati anche in alcuni CRI (il metodo CRI00 o il Color Harmony Index) ci sono i modelli CIECAM97s e CIECAM02. Questi modelli condividono lo stesso workflow, che può essere riassunto nei passi seguenti:

- Dati in input: valori di tristimolo XYZ per lo stimolo considerato, e dati riguardanti il contesto: sfondo, ambiente, sorgente di luce
- Trasformazione da XYZ ad uno spazio dei coni, per poter riprodurre meglio alcuni processi del sistema visivo umano
- Trasformazione di adattamento cromatico (CAT)
- Modellazione della teoria dei colori opponenti (per cui un colore può essere definito in base a 3 assi: bianco-nero, rosso-verde, blu-giallo)
- In output: attributi percettivi del colore, inclusi almeno chiarezza, tinta e croma.

2.2 Color Quality Scale (CQS)

²Nel Color Quality Scale (CQS), proposto da Davis e Ohno [13-14] si tiene conto degli spostamenti di tinta e saturazione, considerando che una sorgente di luce con CCT molto alta o molto bassa può avere un valore di CRI elevato, ma avere scarsa resa visiva. Essi ipotizzano inoltre che l'utilizzo di una trasformazione di adattamento cromatico più appropriata eliminerebbe la necessità che le temperature colore della sorgente test e dell'illuminante di riferimento corrispondano. Il loro CQS prende spunto dal CRI standard ma incorpora alcuni miglioramenti con lo scopo di superarne i limiti.

² vedi anche i report tecnici del PAR2008-2009

La prima modifica consiste nel sostituire i campioni di colore utilizzati: nel CQS sono 15 ad elevata saturazione, estratti dall'Atlante di Munsell, con i seguenti valori di hue value/chroma: 7.5 P 4 / 10, 10 PB 4 / 10, 5 PB 4 / 12, 7.5 B 5 / 10, 10 BG 6 / 8, 2.5 BG 6 / 10, 2.5 G 6 / 12, 7.5 GY 7 / 10, 2.5 GY 8 / 10, 5 Y 8.5 / 12, 10 YR 7 / 12, 5 YR 7 / 12, 10 R 6 / 12, 5 R 4 / 14, and 7.5 RP 4 / 12.

In figura 4 è possibile vedere una rappresentazione dei campioni quando illuminati da una sorgente di luce D65.



Figura 4: campioni usati nel calcolo del CQS, osservati sotto una illuminante D65. Immagine presa da [14].

In secondo luogo, viene impiegato lo spazio colore CIELAB 1976 al posto dello spazio CIEUVW 1964, in quanto percettivamente più uniforme.

Tenendo conto del fatto che generalmente la nitidezza visiva migliora all'aumentare della saturazione [14], il CQS non penalizza una lampada se questa aumenta la saturazione.

Viene introdotto un fattore moltiplicativo che penalizza l'indice di resa per sorgenti di luce con valori di CCT estremamente alti o bassi. In questi casi infatti la resa visiva degrada, mentre il CRI standard risulta alto.

Il fattore di moltiplicazione viene determinato sulla base dell'area di gamut (cioè l'area del poligono i cui vertici sono dati dalle coordinate di cromaticità dei 15 campioni di colore) nello spazio CIELAB ed è calcolato come il rapporto tra l'area di gamut che si origina per sorgenti di luce con una particolare CCT e l'area di gamut che si origina a partire da un illuminante con CCT pari a 6500 K.

Sebbene improbabile, può capitare che il calcolo del CRI sia negativo, quindi viene definita una nuova scala tra 0 e 100 con lo scopo di trasformare i valori negativi in positivi.

Infine, gli autori suggeriscono di utilizzare le trasformazioni di adattamento cromatico (CAT) CMC-CAT2000 o CIE CAT02 al posto del metodo di von Kries, usato nel CRI standard.

2.3 Metodo CRI R96a

³Anche la CIE ha lavorato sull'ideazione di un nuovo indice di resa cromatica. R96a viene pubblicato nel 1999 con i commenti della commissione tecnica TC1-33 sulla resa del colore [15]. Anche se, a causa dei disaccordi tra ricercatori e produttori, la commissione non fu in grado di definire raccomandazioni, i seguenti punti furono esposti.

Primo, essi raccomandarono di sostituire i 14 campioni di colore Munsell con altri 10 campioni, 8 dei quali presi dal Macbeth ColorChecker e altri 2 tonalità della pelle, caucasica e orientale. Venne inoltre segnalata l'inadeguatezza della attuale trasformazione di adattamento cromatico. Un altro punto riguardò l'utilizzo dello spazio CIELAB al posto del CIE UVW per calcolare le differenze di colore. La media aritmetica dei CRI specifici calcolati sui 10 campioni di colore portano all'indice di resa generale R96a.

³ vedi anche i report tecnici del PAR2008-2009

L'ultimo punto di discussione riguardò l'illuminante di riferimento da utilizzare. La proposta fu quella di far riferimento solo a sei illuminanti e più precisamente: D65, D50 per quanto riguarda gli illuminante Daylight e quattro radiazioni del corpo nero a 4200K, 3450K, 2950K e 2700K, scegliendo quella più vicina alla sorgente di luce di test, nello spazio CIELAB.

2.4 Metodo CRI00

⁴Geisler-Moroder e Dur [16] hanno aggiornato la versione standard del CRI, utilizzando in pratica la stessa procedura, ma basandosi su equazioni diverse. In questo approccio essi sostituiscono lo spazio CIEUVW con il CIELAB 1976.

Inoltre applicano la trasformazione di Bradford nella sua versione linearizzata per compiere l'adattamento cromatico, usata anche nel modello di apparenza colore CIECAM97s. Infine la distanza euclidea, utilizzata per valutare le differenze di colore, viene sostituita dalla più recente CIEDE2000.

2.5 Color Harmony Index

Szabò e alt. [17] hanno ideato un indice basato sull'armonia dei colori. Il primo passo consiste nel costruire una serie di formule euristiche per predire l'armonia di due/tre colori mostrati ad un certo numero di osservatori (esempio in figura 5). L'armonia dei colori viene descritta in funzione di differenze di croma (chroma), chiarezza (lightness) e tinta (hue) nel modello CIECAM02.

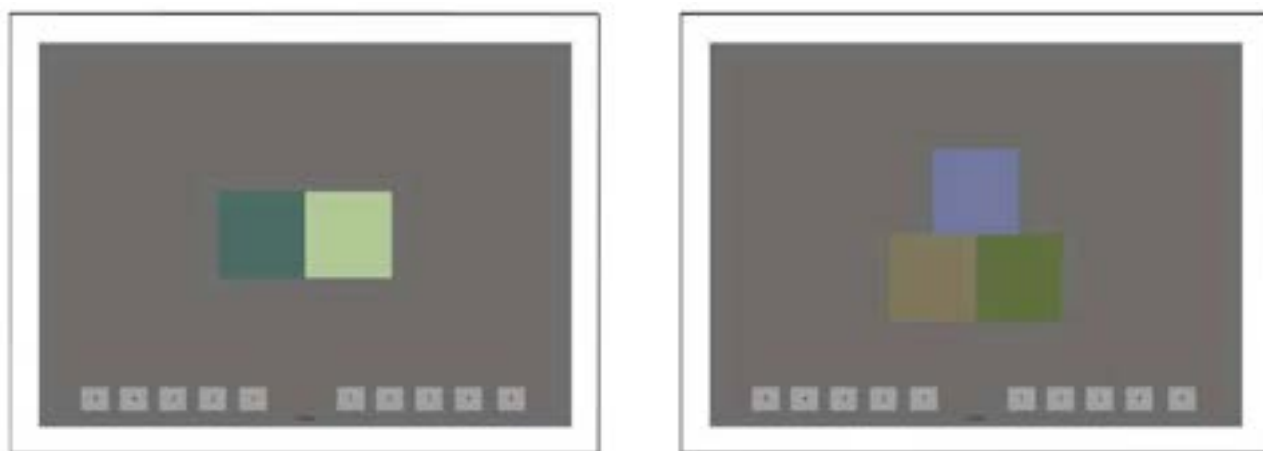


Figura 5: esempi di combinazioni di due e tre colori mostrati su un monitor CRT. Immagine presa da [17].

Secondo gli autori, l'armonia dei colori percepita varia quando la sorgente di riferimento viene sostituita con una sorgente test. Per calcolare l'indice di resa armonica (harmony rendering index - HRI) si calcola la differenza nella predizione dell'armonia per un insieme di combinazioni di campioni di colore test osservati sotto la luce test e osservati sotto la luce di riferimento. In questo modo potrà essere caratterizzato la proprietà di resa armonica del colore della sorgente test quantificando la distorsione della armonia di colore percepita di un insieme di campioni osservati sotto la luce test rispetto alla luce di riferimento (sotto i quali i campioni sono armonici):

⁴ vedi anche i report tecnici del PAR2008-2009

$$R_{hr} = 100 + k * \sum_{i=1}^n CHF_{i,ref} - CHF_{i,test}$$

dove $CHF_{i,ref}$ è l'indice di armonia calcolato rispetto la sorgente di luce di riferimento, $CHF_{i,test}$ l'indice rispetto la sorgente test, n indica il numero di combinazioni di campione di colori test che sono armonici sotto la sorgente di riferimento e usati per calcolare R_{hr} , infine k è una costante che serve a trovare valori ragionevoli di R_{hr} . Il valore di tale costante è 5.

2.6 Approccio basato su oggetti/sulla memoria

Questo metodo che analizziamo si distingue in maniera netta dai precedenti. Parte dal presupposto che nella maggior parte dei CRI è necessario utilizzare una illuminante di riferimento, che abbia caratteristiche ottime. Poiché questo concetto è di difficile interpretazione, ed è effettivamente uno dei problemi del CRI, Smet et al [18-19] hanno ideato un metodo che non avesse bisogno di una illuminante di riferimento: essi lavorano su oggetti reali, illuminati da sorgenti test

Il loro metodo (MCRI: memory color rendering index) è basato su una serie di esperimenti visivi: ad un gruppo di osservatori è stato richiesto di valutare l'apparenza colore di nove oggetti familiari. Il criterio di valutazione era la somiglianza con la realtà.

Maggiormente la sorgente test era in grado di rendere i colori dell'oggetto simili ai colori della memoria, maggiore era l'indice di resa cromatica per quella sorgente.

Lo scopo di un approccio basato su oggetti è stabilire un metodo più naturale per valutare la resa del colore con una corrispondenza migliore alle abilità di resa cromatica visiva di tutte le sorgenti di luce.

Il concetto di base è quello di riferirsi non ad un'illuminante ma all'idea di come certi oggetti famigliari dovrebbero o potrebbero apparire al variare dell'illuminante.

Il metodo [18-19] consiste nel trovare quali sono i limiti di colore definiti accettabili di alcuni oggetti famigliari. Entro tali limiti l'apparenza di un oggetto può variare ma risultare comunque accettabile o naturale indipendentemente dalla sorgente di illuminazione che in tal caso è considerata avere una buon indice di resa cromatica per quell'oggetto. Questo meccanismo può essere esteso ad un insieme di oggetti opportunamente scelti, con il risultato di avere una valutazione di resa cromatica più generale.

Il colore di un oggetto illuminato da una certa sorgente di luce può cadere all'interno o all'esterno dei confini accettabili. Modellando tali confini con ellissoidi è possibile utilizzare una metrica per misurare la similarità della resa del colore dell'oggetto rispetto a ciò che ci si aspetta (es. il colore prototipico). Minore è tale distanza, maggiore è la similarità con il colore che ci si aspetta e quindi migliore la resa cromatica di tale oggetto. L'indice di resa generale viene calcolato facendo una media di indici specifici calcolati su un insieme di oggetti.

Esistono due modi per mostrare gli oggetti agli osservatori che giudicano i confini dell'accettazione del colore. Il primo consiste nel presentare gli oggetti come immagini su un monitor del computer calibrato e poi modificare il loro colore e far giudicare a degli osservatori la similarità del colore degli oggetti presentati con la loro idea di come dovrebbe essere. Nel secondo modo gli oggetti vengono posizionati su una piattaforma all'interno di una cabina di visualizzazione, e vengono illuminati da faretti e LED colorati ad alta potenza (figura 6).

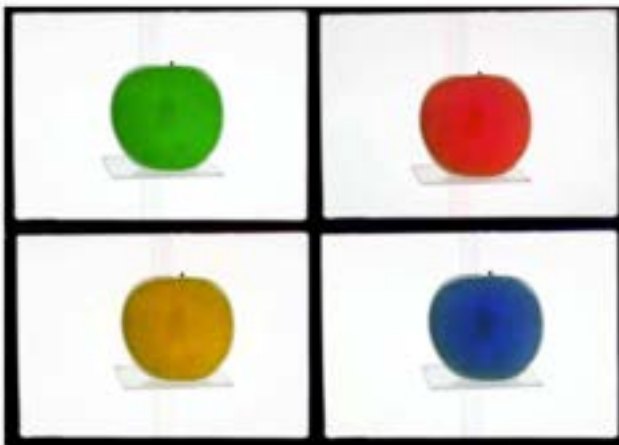


Figura 6: a sinistra: una mela illuminata da diverse illuminanti. A destra: il setup sperimentale (immagine presa da [18]).

2.7 Metodo di Da Pos

In questo lavoro [20] vengono delineati due nuovi indici di resa cromatica in cui non si fa riferimento allo spettro della sorgente di luce da analizzare ma all'influenza che la luce ha sulla percezione (multisensoriale) degli oggetti. Secondo gli autori i colori da utilizzare sono le unique hues (tinte uniche: rosso, verde, blu, giallo), che rappresentano la struttura base della nostro sistema visivo. Nel loro esperimento la sorgente di luce da testare viene posizionata in una light booth (cabina di luce). Agli osservatori vengono richiesti due task:

- 1- scegliere le 4 unique hues da 4 serie di cilindri colorati (si veda figura 7) osservato ad una distanza di 50 cm, posizionati nella light booth

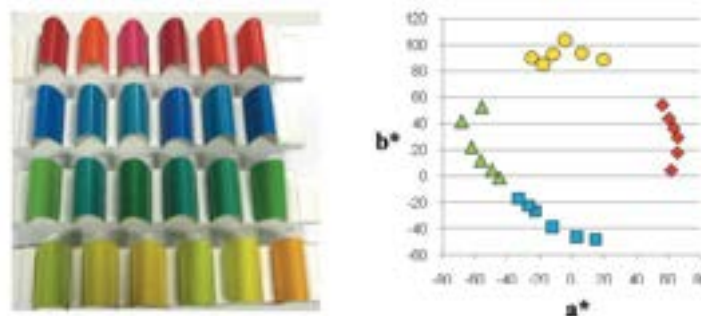


Figura 7: a sinistra: campioni di forma cilindrica, rappresentanti le 4 serie di campioni tra cui scegliere le unique hues. A destra gli stessi colori plottati sul diagramma CIELAB. Immagine presa da [20].

- 2- descrivere la sorgente di luce dando una valutazione del differenziale semantico (composto da una serie di scale, in cui due aggettivi bipolari, es: buono-cattivo, stanno agli estremi, e l'utente deve valutare in che posizione si trova tra questi due) multisensoriale.

Questo secondo task era eseguito usando un differenziale semantico sensoriale, evitando cioè di usare il linguaggio verbale, il quale potrebbe introdurre uno stage rappresentativo che andrebbe a impoverire la sensazione provata. Alcuni degli stimoli sensoriale usati sono riportati nel seguito:

- stimoli tattili: acqua calda-acqua fredda

- stimoli gustativi: miele-amaro di Udine
- stimoli auditivi: suoni alti-suoni bassi

L'idea è sicuramente diversa da quelle proposte fino ad adesso. Associare ad una specifica sorgente di luce una esperienza sensoriale potrebbe rivelare secondo gli autori alcune qualità della luce inaspettate.

2.8 Indice di resa cromatica basato sui nomi categorici dei colori

Yaguchi [21] basa il suo lavoro sulla categorizzazione dei nomi dei colori. Poiché il nome dei colori gioca un ruolo importante nei campi come la comunicazione, codifica, riproduzione dei colori, esso deve rimanere lo stesso indipendentemente dalle condizioni di vista (un oggetto rosso deve essere rosso sia sotto la luce del sole che se illuminato da una lampadina al tungsteno). L'uso dei nomi dei colori risulta quindi essere un metodo utile per comunicare le informazioni sul colore sotto varie condizioni di illuminazione.

Essi compiono esperimenti visivi utilizzando quattordici tipi di sorgente di luce (8 lampade fluorescenti, 5 lampade a scarica ad alta intensità e una lampada ad incandescenza), chiedendo ai soggetti di suddividere 292 campioni in undici categorie base: rosso, verde, giallo, blu, arancione, rosa, viola, marrone, bianco, grigio e nero. La classificazione di ogni campione di colore sotto ogni illuminante è stata ripetuta tre volte in diverse sessioni sperimentali.

I campioni avevano dimensione 5.5 x 7 cm, posti sopra un background grigio.

Al test sono stati sottoposti quattro studenti con visione normale.

In figura 8 alcuni esempi dei campioni di colore nel cerchio delle tinte di Munsell, sotto tre diverse sorgenti di luce: lampada fluorescente D65, lampada ai vapori di mercurio (H), lampada alogena IL. La V indica il valore di intensità.

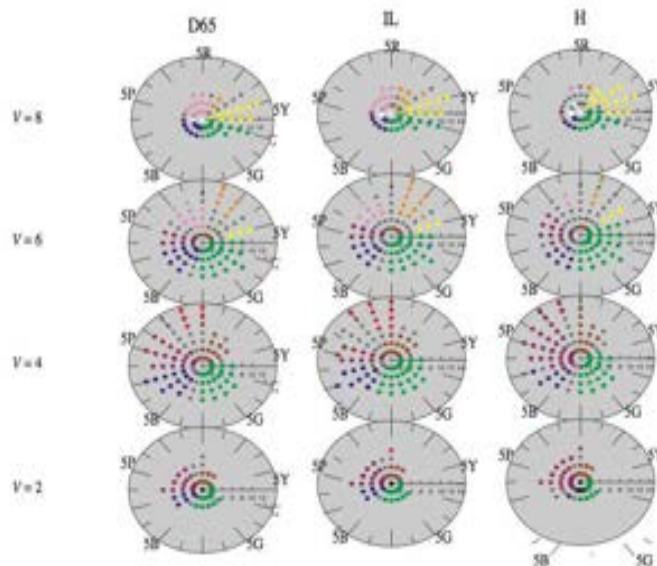


Figura 8: campioni di colore ordinati in maniera consistente nella stessa categoria di nome del colore, per tre illuminanti tipiche: D65, IL e H al variare di V. Immagine presa da [21].

I dati vengono convertiti applicando il CIECAM97s, in modo da calcolare per ogni campione la chiarezza (lightness: J), la croma (C) e la tinta (hue: h).

A seconda dell'illuminante si osserva quanti campioni cadono nelle categorie corrette (le categorie corrette vengono identificate osservando i campioni sotto una illuminante D65), ed in base a ciò si calcola l'indice di resa colore categorico.

In pratica si definisce una regione S_i per ogni nome di colore 'i' a partire dalla posizione dei campioni di colore sul cerchio delle tinte nello spazio CIECAM97s osservati sotto l'illuminante D65 (illuminante di riferimento). Si calcola poi la regione S_t (per una certa illuminante test) allo stesso modo. Infine l'indice categorico viene definito come:

$$S = 100 \left(\frac{S_i \cap S_t}{S_i} \right)$$

2.9 Indice di resa cromatica CRI-CAM02 UCS

Li et al [22] propongono un metodo simile al CRI standard (in figura 9 viene confrontato il workflow del CRI standard con quello del CRI-CAM02UCS). Al posto di usare la trasformazione di adattamento cromatico di von Kries e lo spazio colore ($U^*V^*W^*$) si utilizza lo spazio CAM02-UCS (un'estensione del CIECAM02, con lo scopo di predire le differenze di colore).

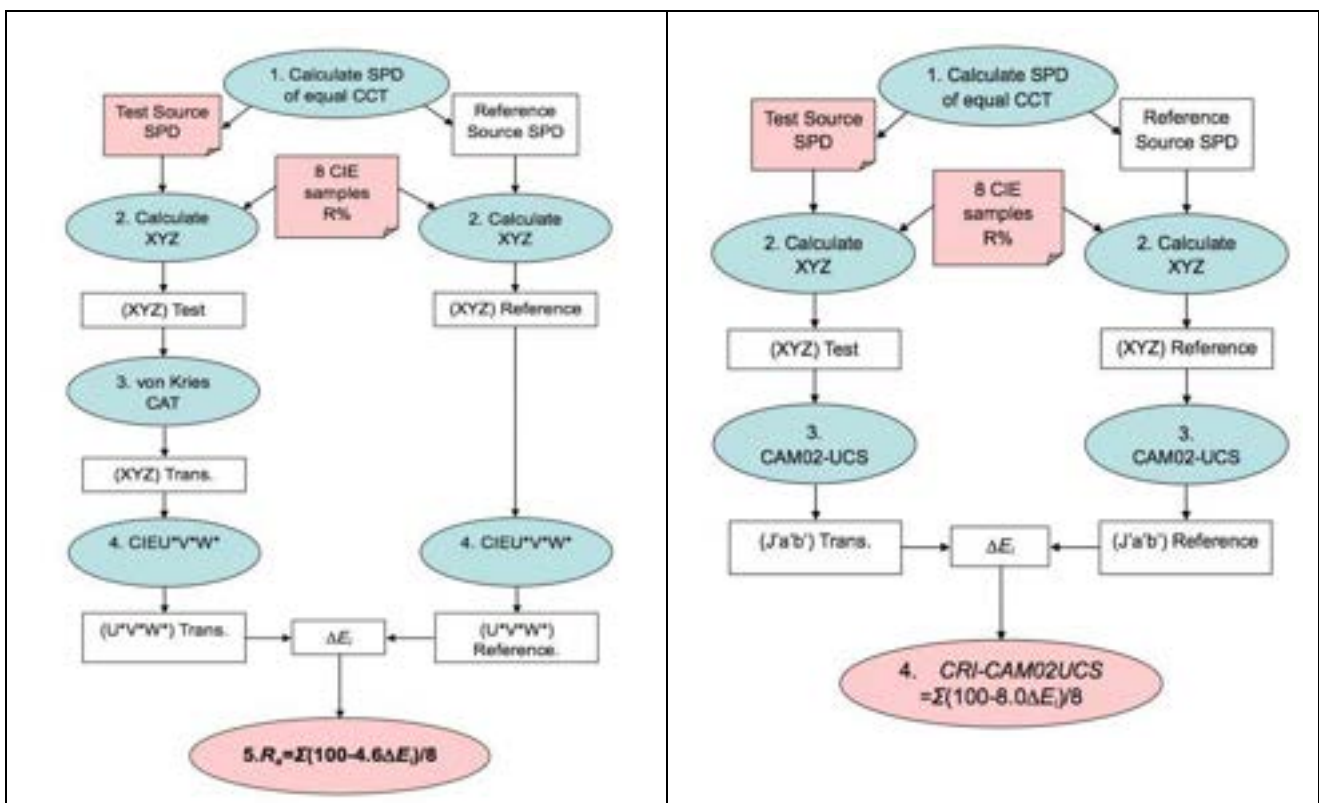


Figura 9: confronto tra il workflow per il calcolo dello standard CRI (a sinistra) e il CRI-CAM02UCS (a destra). Immagine presa da [22].

La trasformazione di adattamento cromatico incorporata nel CAM02-UCS è la CAT02. Calcolati quindi i valori di J' , M' e h nello spazio CAM02-UCS sia per la sorgente di riferimento che per la sorgente test, si calcola la differenza per ogni campione, con la formula:

$$\Delta E(CAM02-UCS) = \sqrt{\Delta J'^2 + \Delta a_M'^2 + \Delta b_M'^2}$$

Poi nello stesso modo del CRI standard (a meno della costante moltiplicativa) si calcola il CRI per ogni campione di colore ed infine il CRI medio:

$$R_i = 100 - 8 * \Delta E(CAM02-UCS)_i$$

$$CRI - CAM02-UCS = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

2.10 Gamut Area Index

Freyssinier e Rea [23] propongono un approccio che faccia uso di due misure, per valutare la resa cromatica di una sorgente di luce. La prima misura è il classico CRI, che enfatizza la stabilità dei colori rispetto ad una sorgente di luce familiare (sorgente di riferimento).

Il secondo aspetto (GAI: indice di gamut area) riguarda la capacità di discriminare differenti colori.

L'area di gamut è l'area del poligono definito dalle coordinate di cromaticità nello spazio CIE u'v'.

In figura 10 sono visibili diversi esempi di area di gamut di alcune illuminanti.

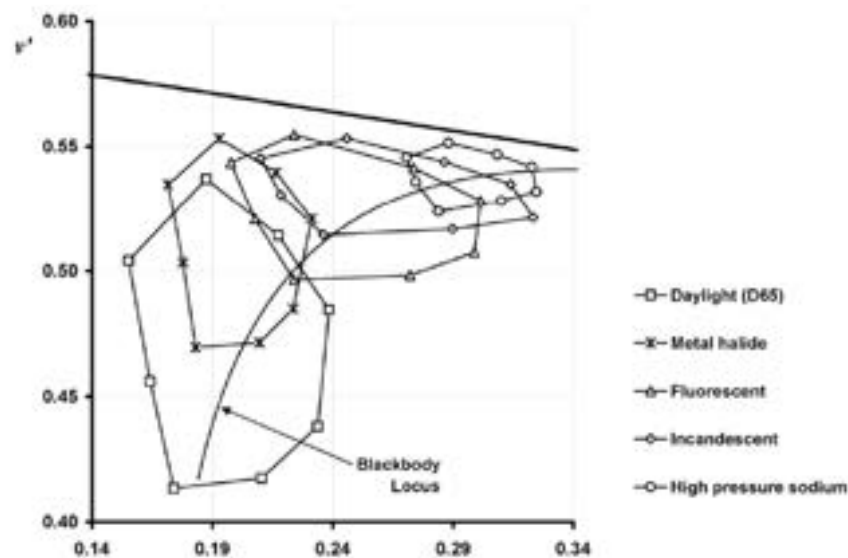


Figura 10: esempi di area di gamut nello spazio u'v' di alcune illuminanti. Immagine presa da [23].

L'indice GAI è calcolato come:

$$GAI = 100 * \frac{GA_{TS}}{GA_{EES}}$$

Dove GA_{TS} è l'area di gamut della sorgente test e GA_{EES} è l'area di gamut dell'illuminante E (Equal Energy Stimulus). Questa area è costante e vale 0.007354.

Quando il CRI è maggiore o uguale ad 80 e il GAI è compreso tra 80 e 100, la sorgente di luce assicura una apparenza naturale e vivida degli oggetti.

2.11 Metodo di Oleari

Oleari [24] propone due indici che insieme dovrebbero rappresentare la qualità della resa visiva di una sorgente di luce. Entrambi gli indici sono definiti sul color gamut teorico nello spazio OSA_UCS (L, G, J), i cui confini sono definiti dai limiti di MacAdam per una certa lightness L_{OSA} .

Il primo indice, denominato I_a , è definito come la percentuale dell'area della regione di lightness costante, percepita come uniforme all'interno dei limiti delle ellissi di McAdam.

Il secondo indice, denominato I_b , è definito come la percentuale reciproca dell'angolo maggiore di differenza di tinta, misurato all'interno dei limiti delle ellissi di McAdam, nella regione di lightness costante e riflettanza contigua con distanza reciproca nelle lunghezze d'onda di 1nm. Per quest'ultimo calcolo si utilizzano delle riflettanze ideali di forma quadrata e massime in tutta la zona per cui sono definite.

2.12 Rank order Color Rendering Index (RCRI)

⁵L'RCRI sviluppato da Bodrogi e altri [25-26] è un indice di resa cromatica ricavato a partire da una serie di esperimenti psico-fisici. È calcolato su un insieme di 17 campioni di colore (12 presi dal Macbeth Color Checker e 5 prese dal NIST Color Set, si veda figura 4) illuminate da una sorgente test e da una illuminante di riferimento.



Figura 11: i 17 campioni usati per il calcolo del RCRI. Immagine presa da [25].

I passi per il calcolo possono essere trovati in [27].

1. Si calcolino le differenze di colore per i 17 campioni di colore test ($\Delta E_{calc,k} : k=1-17$) usando la formula CAM02-UCS, osservati sotto la luce test e la luce di riferimento (per ulteriori dettagli su questo punto si veda [27])
2. Per ogni campione ($k=1-17$) si calcolino i seguenti valori:
 - a. $|2.0146 - \Delta E_{calc,k}|$
 - b. $|2.3681 - \Delta E_{calc,k}|$
 - c. $|3.7538 - \Delta E_{calc,k}|$
 - d. $|6.5312 - \Delta E_{calc,k}|$
 - e. $|11.2818 - \Delta E_{calc,k}|$
3. Per ogni elemento k si determini quale delle cinque differenze assolute è la minore. Se la prima differenza (a) è la minore, allora il ranking predetto per il campione k è uno. Nel caso sia minore la seconda (b), il ranking predetto è due, e così via fino a cinque (e).
4. Si conti il numero N_1 di campioni che hanno un ranking predetto pari a uno.
5. Si conti il numero N_2 di campioni che hanno un ranking predetto pari a due.
6. A seconda del numero di campioni considerati eccellenti (N_1) e buoni (N_2) l'indice si calcola con la formula:

$$RCRI = 100 * \left(\frac{N_1 + N_2}{17} \right)^{1/3}$$

⁵ vedi anche i report tecnici del PAR2008-2009

2.13 Metodo di Monte Carlo

Al posto di usare un limitato numero di campioni test, Whitehead e Mossman [28] suggeriscono di utilizzare un grandissimo numero (un migliaio o più) di spettri di riflettanza generati con un metodo di Monte Carlo, andando a simulare molti colori con varie proprietà (di tinta, saturazione ecc...).

L'algoritmo di generazione degli spettri è basato sulla fisica ottica di molecole che assorbono luce e risultano quindi fisicamente plausibili. In questo modo è possibile valutare le performance di una determinata lampada. Si prosegue sulla stessa linea del CRI standard o degli indici derivati da esso, trasformando gli spettri osservati sotto la luce test e sotto una luce di riferimento nello spazio CIELAB e calcolandone la differenza colore, usando la formula DE2000.

2.14 Metodo di Hashimoto

Essi [29] definiscono un indice FCI (Feeling of Contrast Index) da affiancare allo standard color rendering index. Questo indice quindi non ha l'intenzione di sostituire l'indice già esistente ma di completarlo per poter descrivere meglio le caratteristiche di resa visiva di una sorgente di luce.

Il Feeling of Contrast (sensazione del contrasto) è legato al concetto di chiara discriminazione tra i colori della superficie di vari oggetti sotto una certa sorgente di luce. Il concetto che sta alla base di questo indice è che una sorgente di luce che aumenta la sensazione di contrasto aumenta anche la saturazione del colore degli oggetti, situazione che viene in genere preferita dagli osservatori.

Di seguito vengono descritti i passi per calcolare l'indice FCI.

1. Selezionare una combinazione di quattro colori (figura 12) con tinte rosso, giallo, verde e blu ad alta saturazione (notazione Munsell: 5R 4/12, 5Y 8.2/10, 5.5G 5/8, 4.5PB 3.2/6).



Figura 12: combinazioni di colore per il metodo di Hashimoto.

2. Calcolare i valori di tristimolo di ogni colore della combinazione dei quattro colori sotto l'illuminante test (T).
3. Calcolare i valori di tristimolo dei colori corrispondenti osservati sotto l'illuminante di riferimento D65, utilizzando la trasformazione di adattamento cromatico della CIE (CIE 109-1994) [30]. Per farlo si mantiene costante a 1000 lx il valore di illuminanza della sorgente test, in modo che sia uguale a

quella di riferimento. Inoltre il fattore di luminanza dello sfondo Y_0 è posto a 20 sia per l'illuminante test che per l'illuminante di riferimento.

4. Calcolare l'area di gamut per l'illuminante test. Per farlo si convertono i valori di tristimolo dei colori corrispondenti di ogni componente colore R,Y,G,B nello spazio CIELAB. L'area di gamut $G(T, E_t=1000 \text{ lx})$, dove T indica la sorgente test con una luminanza di 1000 lx, viene calcolata sommando le aree di due triangoli. Seguendo ciò che è specificato in [31] la componente colore rossa viene ritenuta la più importante, per questo motivo i due triangoli che si sommano sono formati dai vertici: rosso, giallo e verde e il secondo da rosso, blu e verde (si veda figura 13).

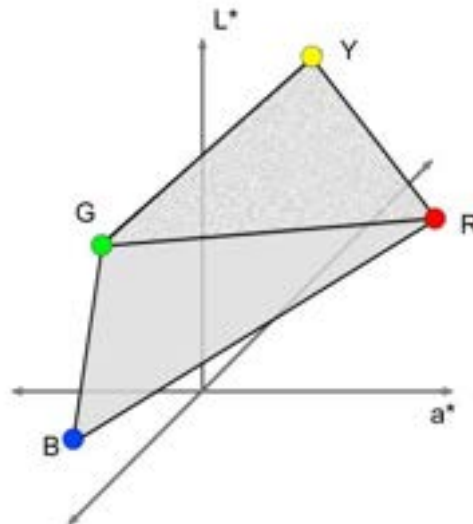


Figura 13: gamut area nello spazio CIELAB.

5. Similmente si calcola l'area di gamut $G(D65, E_r=1000 \text{ lx})$ per l'illuminante di riferimento D65.
6. Infine si calcola l'indice FCI con la formula:

$$FCI = \left[\frac{G(T, E_t = 1000 \text{ lx})}{G(D65, E_r = 1000 \text{ lx})} \right]^{1.5} \times 100$$

3. Apparenza, contrasto e dinamica

Il contrasto percepito è un parametro essenziale della percezione visiva. Infatti, quello che il nostro sistema visivo percepisce è la differenza di luminosità e di colore della scena che osserva, cioè il contrasto.

Misurare il contrasto risulta una parte importante nella valutazione di una sorgente luminosa. Una sorgente luminosa buona non solo garantisce il più possibile la resa cromatica degli oggetti ma garantisce anche un contrasto adeguato ad una visione confortevole.

Il problema è che il concetto di contrasto sfugge la sua definizione. A tutt'oggi vi sono diverse definizioni di contrasto a seconda del contesto di utilizzo, ma nessuna è universalmente riconosciuta come misura del contrasto percepito.

La maggior parte delle misure psicofisiche svolte a fino ad adesso è stata condotta in condizioni di stimolo isolato dal contesto. Questo è stato spesso necessario a causa della notevole complessità del Sistema Visivo Umano (SVU) ed anche in alcuni casi per le caratteristiche degli strumenti a disposizione.

Uno dei problemi principali del Color Rendering Index è che cerca di stimare la bontà della luce calcolando un unico indice, che chiaramente non può tener conto di tutti i fattori che rendono una sorgente di luce visivamente piacevole.

Le misure di contrasto presentate di seguito sono un primo tentativo di valutare come sostituire i modelli eccessivamente semplificati del sistema visivo utilizzati in molti CRI con qualcosa di più completo.

Anche se su questo fronte di ricerca è necessaria una ulteriore sperimentazione, abbiamo voluto sperimentare un metodo di valutazione del CRI che tenga conto non solo delle caratteristiche dell'illuminante, ma anche delle caratteristiche visive della scena osservata.

3.1 Misure di contrasto globale

Nel campo delle immagini sia analogiche che digitali il tema del contrasto è stato affrontato da vari autori, all'inizio in modo estremamente semplificato e via via aggiungendo complessità e cercando di legare il più possibile la misura al contesto d'uso. A partire dalle prime misure di contrasto globale si è giunti a misure locali molto più vicine alla nostra percezione.

Per quanto riguarda l'illuminotecnica si pensi alla caratterizzazione della luminosità di un ambiente. In tale ambiente vi saranno zone più e meno illuminate. Una misura di contrasto globale si basa su un qualche rapporto tra il punto a luminosità maggiore e quello a luminosità minore. Tuttavia, in questo modo, non si riesce a prendere in considerazione la distribuzione spaziale della luminanza che è la cosa più interessante da analizzare.

La prima formula di contrasto, ancora oggi una delle più note e molto diffusa, è datata 1927, definita da Milchelson [32]:

$$C_M = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$

Tale misura è globale. Altre simili misure globali sono quelle di King-Smith and Kulikowski del 1975 [33], Burkhardt del 1984 [34] e Whittle (1986) [35].

Solo a partire dagli anni 90, con Peli [36] cominciano ad essere studiate efficaci misure del contrasto percepito nel contesto.

3.2 Peli (1990)

La misura del contrasto ideata da Peli è locale [36]. Questa caratteristica importante la rende adatta per l'uso in contesti e immagini naturali. Al fine di ottenere una misura del contrasto efficiente si usa una rappresentazione multi-livello, cioè un'insieme di copie dell'immagine passa-banda o passa-basso, ognuna rappresentante informazioni ad una scala differente. Questa struttura piramidale di filtri passa-banda è dunque centrata su frequenze differenti e distanziate di una ottava una dall'altra. La piramide di immagini viene poi filtrata per ottenere un'altra serie di immagini, ognuna rappresentante una porzione dell'immagine ad una prefissata frequenza. Per ogni livello di frequenza viene calcolata la luminanza media. Infine ogni pixel dell'immagine è diviso per la luminanza media, ottenendo una misura di contrasto locale ad ogni livello.

3.3 Ahumada (1996)

Di seguito viene descritto il metodo di Ahumada [37] per calcolare il contrasto.

Viene applicato un filtro passa basso Gaussiano (F_b) all'immagine I:

$$B(x, y) = I(x, y) * F_b(x, y)$$

Si fa una convoluzione dell'immagine risultante B con un secondo filtro passa basso gaussiano F_l :

$$L(x, y) = B(x, y) * F_l(x, y)$$

In seguito, per ogni pixel dell'immagine, il contrasto locale è definito come:

$$C(x, y) = \frac{B(x, y)}{L(x, y)} - 1$$

3.4 Tadmor e Tolhurst (1998)

Tadmor and Tolhurst [38] calcolano il contrasto che le cellule gangliari retinali e i neuroni del nucleo genicolato laterale possono incontrare in scene naturali. Il loro lavoro si basa sul modello dei campi recettivi D.O.G. (Difference Of Gaussian, Differenze di Gaussian), modificato e adattato ad immagini naturali.

Nel modello convenzionale, la sensibilità spaziale al centro C dei campi recettivi è descritta come una Gaussiana bi-dimensionale con ampiezza pari a 1.0:

$$C(x, y) = \exp \left[-\left(\frac{x}{r_c} \right)^2 - \left(\frac{y}{r_c} \right)^2 \right]$$

Dove il raggio r_c rappresenta la distanza sotto la quale la sensibilità diminuisce secondo 1/e rispetto al livello massimo (di picco) e (x,y) sono le coordinate spaziali del campo recettivo.

La componente circostante (surround S) è rappresentata da un'altra curva Gaussiana, con un raggio maggiore, r_s :

$$S(x, y) = 0.85 * \left(\frac{r_c}{r_s} \right)^2 * \exp \left[-\left(\frac{x}{r_c} \right)^2 - \left(\frac{y}{r_c} \right)^2 \right]$$

Quando il punto centrale del campo recettivo è posizionato nel punto (x,y) , il risultato della componente centrale è calcolato come:

$$R_c(x,y) = \sum_{i=x-3r_c}^{i=x+3r_c} \sum_{j=y-3r_c}^{j=y+3r_c} C(i-x, j-y) I(i, j)$$

Mentre l'output della componente surround è:

$$R_s(x,y) = \sum_{i=x-3r_c}^{i=x+3r_c} \sum_{j=y-3r_c}^{j=y+3r_c} S(i-x, j-y) I(i, j)$$

$I(i,j)$ rappresenta il valore del pixel nella posizione (i,j)

Il risultato del modello DOG si ottiene da:

$$DOG(x,y) = R_c(x,y) - R_s(x,y)$$

Nel modello DOG convenzionale si assume che la risposta di un neurone dipenda unicamente dalla differenza di luminanza locale (ΔI) tra il centro e lo sfondo (surround). Tuttavia dopo il processo di adattamento luminoso, il guadagno (gain) delle cellule gangliari della retina e dei neuroni LGN dipende dalla luminanza locale media $\bar{I}$. Di conseguenza la risposta globale del modello dipende dallo stimolo di contrasto $\Delta I / \bar{I}$.

Quindi il modello DOG deve essere modificato per poter includere una divisione di normalizzazione, rispetto alla luminanza media $\bar{I}$ per far sì che l'output del modello dipenda dal contrasto.

Tre criteri sono stati proposti da Tadmor and Tolhurst per misurare il contrasto, a seconda delle possibili dimensioni dell'adaptation pool (regione retinale dove viene calcolata da un neurone la luminanza media):

Centre-only adaptation scheme:

$$Contrast(x,y) = \frac{R_c(x,y) - R_s(x,y)}{R_c(x,y)}$$

Surround-only adaptation scheme:

$$Contrast(x,y) = \frac{R_c(x,y) - R_s(x,y)}{R_s(x,y)}$$

Il terzo schema è un ibrido dei due:

$$\text{Contrast}(x,y) = \frac{R_c(x,y) - R_s(x,y)}{R_c(x,y) + R_s(x,y)}$$

3.5 Reinagel e Zador (1999)

Nel loro lavoro [39] Reinagel e Zador studiano il movimento dell'occhio umano nell'osservare immagini di scene naturali.

In questo modello vengono estratti N pixel da una immagine, che corrispondono alle aree sopra cui l'occhio umano sosta più a lungo durante il processo di osservazione di una immagine (sono state considerate immagini con dimensione 640 x 480 pixel, a 256 gradazioni di grigio). Essi definiscono il contrasto come:

$$C = \bar{I}^{-1} N^{-1} \sum_k \left[\sum_{(i,j) \in \Pi_k} (I_{ij} - \bar{I}_k)^2 \right]^{1/2}$$

dove:

- I_{ij} è l'intensità del pixel nelle coordinate i,j ;
- $\bar{I}_k$ è l'intensità media della k -esima patch;
- $\bar{I}$ è l'intensità media dell'intera immagine;
- k area di 23 x 23 pixel (stimata in circa 1° rispetto ad una distanza media di visione) intorno al pixel N .

3.6 Rizzi et al. (2004) (RAMM)

⁶Rizzi et al. [40] sviluppano una procedura in grado di stimare le componenti globali e locali del contrasto in maniera semplice ed efficace. A questo scopo è stato elaborato un algoritmo che applica localmente, usando vari livelli di sotto-campionamento, una computazione semplificata del contrasto locale, e alla fine ricombina tutti i valori per ottenere una misura globale; in questo modo la complessità computazionale è ridotta rispetto ad altri metodi locali alternativi, ma mantiene un livello di correttezza nella stima del contrasto comparabile. I passi dell'algoritmo sono descritti in figura 14 sulla sinistra (sezione 3.7)

Il metodo proposto è multi-livello, e crea un sotto-campionamento piramidale, a partire dall'immagine data. Il tipo di sottocampionamento scelto è piuttosto semplice: l'immagine viene dimezzata senza alcun tipo di pre-filtraggio.

Questo approccio è basato sul principio che una analisi multi-canale, non necessariamente sofisticata dal punto di vista delle frequenze, può essere la spiegazione di vari meccanismi di percezione [41].

⁶ vedi anche i report tecnici del PAR2008-2009

Tutti i livelli estratti vengono trasformati da RGB a CIELAB e solo la luminanza viene utilizzata per il calcolo del contrasto percepito:

$$C^{RAMM} = \frac{1}{N_l} \sum_{l=1}^{N_l} \bar{c}_l$$

Dove N_l è il numero di livelli e $\bar{c}_l$ è il contrasto medio al livello l ed è calcolato in questo modo:

$$\bar{c}_l = \sum_{i=1}^{i_{max}} \sum_{j=1}^{j_{max}} c_{l,j},$$

i_{max} e j_{max} rappresentano altezza e larghezza dell'immagine. c_{ij} è il contrasto per ogni pixel calcolato come:

$$c_{ij} = \sum_{n \in N_8} \frac{1}{8} |Pixel_{i,j} - Pixel_n|$$

Dove $Pixel_{i,j}$ è il valore di luminanza del pixel in posizione (i,j) .

Viene calcolato il contrasto con il vicinato, ottenendo una mappa di transizione della luminanza per ogni livello. Dopodiché vengono estratte le medie per ogni livello, che contribuiranno poi alla misura finale.

3.7 Simone et al. (2012)

Nel loro lavoro [42] Simone et al. Estendono l'algoritmo di Rizzi in due direzioni: esaminano se l'utilizzo del modello DOG sulle piramidi multi-livello possa portare ad un miglioramento delle performance ed inoltre valutano il tener conto anche dei canali cromatici per il calcolo del contrasto percepito.

Essi propongono quindi due estensioni del RAMM: la misura *retinal-like subsampling contrast (RSC)* e il *weighted-level frame work (WLF)* per misurare il contrasto percettivo nelle immagini digitali. Il workflow dei tre algoritmi (i due di Simone et al. e quello di Rizzi et al.) è rappresentato in figura 14.

Il RSC calcola in ogni pixel di ogni livello il contrasto DOG al posto del contrasto locale degli 8 vicini, sia sul canale della luminanza che sui due di cromaticanza.

Le misure fatte indipendentemente sui canali sono poi combinate linearmente in maniera pesata (i pesi sono rappresentati da α, β, γ)

$$C^{RSC} = \alpha C_{L^*}^{RSC} + \beta C_{a^*}^{RSC} + \gamma C_{b^*}^{RSC}$$

Nel WLF si introduce un filtro antialiasing durante il processo di subsampling con lo scopo di minimizzare gli artefatti di distorsione a bassa risoluzione.

L'equazione presente nell'algoritmo di Rizzi et al. che calcola il contributo del contrasto ad ogni livello viene ridefinita come:

$$C_i = \frac{1}{N_l} \sum_{l=1}^{N_l} \lambda_l \bar{c}_l$$

dove N_l è il numero di livello $\bar{c}_l$ è il contrasto medio al livello l e i indica il canale.

λ è il peso associato ad ogni livello l .

La misura finale è data dalla combinazione:

$$C^{WLF} = \alpha C_1 + \beta C_2 + \gamma C_3$$

α, β, γ rappresentano i pesi dei singoli canali. Questi, come anche λ , devono essere scelti con cura. Vari test sono stati effettuati per la scelta dei loro valori. Per ulteriori informazioni si veda [42].

Si noti che, con questa formulazione, i tre canali su cui calcolare il contrasto non devono necessariamente essere quelli dello spazio CIELAB, ma possono essere XYZ o RGB.

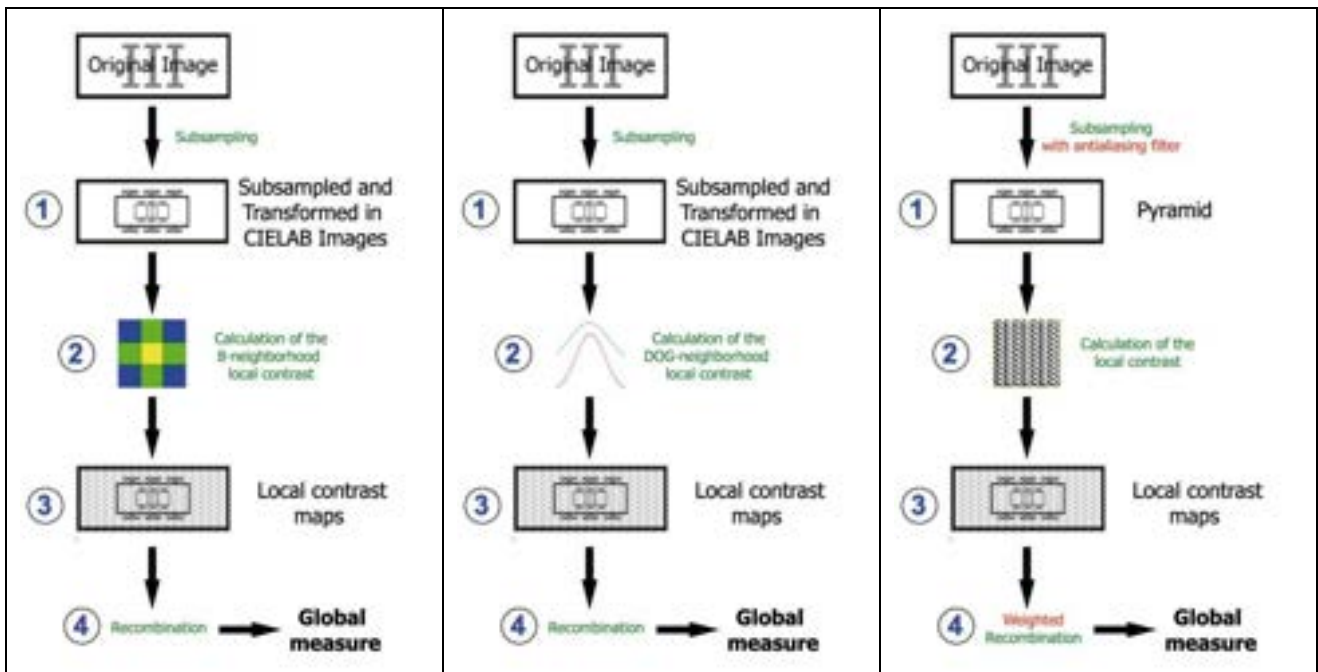


Figura 14: da sinistra a destra: workflow degli algoritmi RAMM (Rizzi et al.), RSC e WLF.

3.8 Contrasto e dinamica della luce

I metodi di calcolo del contrasto percepito visti finora sono stati pensati ed impostati soprattutto per il calcolo del contrasto su immagini digitali. La grossa differenza tra le immagini digitali e le scene reali è l'ampiezza della dinamica della luminanza.

Mentre la dinamica delle riflettanze di una scena è tendenzialmente limitata, in genere all'interno di un rapporto 100:1, la dinamica della luce che illumina questa scena può fare esplodere la dinamica del segnale visivo di parecchi ordini di grandezza. Nell'esempio di Fig. 15 il rapporto della luminanza proveniente dalla vernice bianca e quello della vernice nera è di 30:1.

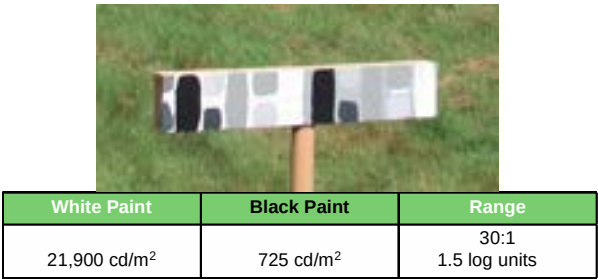


Figura 15: esempio di dinamica della riflettanza

Se però consideriamo anche la dinamica della luce, il rapporto tra la luminanza massima e quella minima può essere decisamente maggiore. Nell'esempio di figura 16 da 30:1 passiamo a 21.900:1 cioè 4,3 unità logaritmiche base 10 [43].

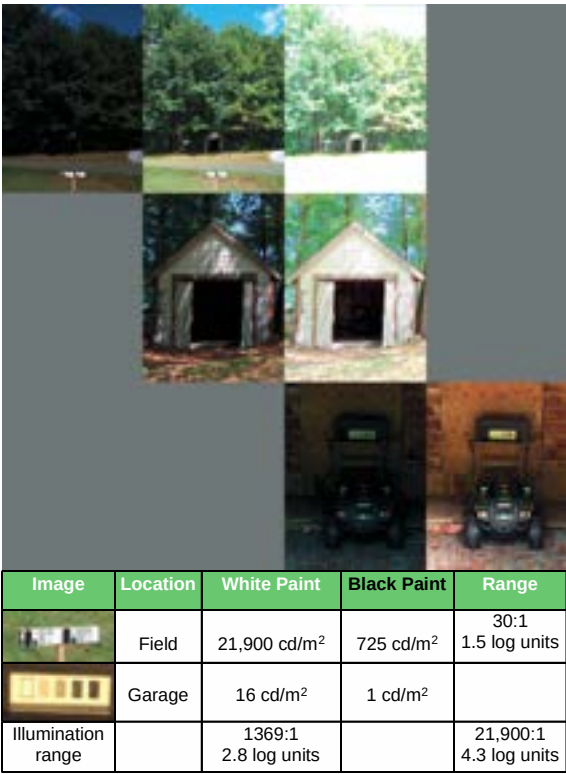


Figura 16: Esempio della dinamica della luce in una scena reale

Spesso i metodi di acquisizione di immagini, sia analogici che digitali, sono limitati in dinamica. Ne segue che per fotografare una scena naturale bisogna fare una scelta di esposizione, decidere per esempio se si vogliono acquisire al centro della dinamica disponibile le zone ad alta o bassa luminosità. Un esempio è visibile in figura 17. Da questo esempio si evince come una immagine digitale spesso sia una versione della scena reale molto compressa nella sua dinamica.



Figura 17: Esempio di scelta espositiva (Cortesia C. Oleari)

Per poter utilizzare delle tecniche computazionali atte a valutare contrasto e colori di una scena utilizzando una immagine digitale di quest'ultima bisognerebbe cercare di massimizzare la dinamica acquisita così che questa sia il più possibile rappresentativa della scena reale. Più che la dinamica fisica assoluta della scena il parametro per noi significativo è in che misura la dinamica della scena sia effettivamente percepibile dal nostro sistema visivo. Per capire meglio i limiti del sistema visivo, abbiamo svolto un esperimento che mette in luce il limite principale del nostro sistema visivo nei confronti della dinamica: il glare o abbagliamento.

Abbiamo realizzato una diapositiva come quella visibile in figura 18, composta da 40 quadrati grigi di intensità differente posti su uno sfondo 50% trasparente (bianco) e 50% a massima opacità (nero).

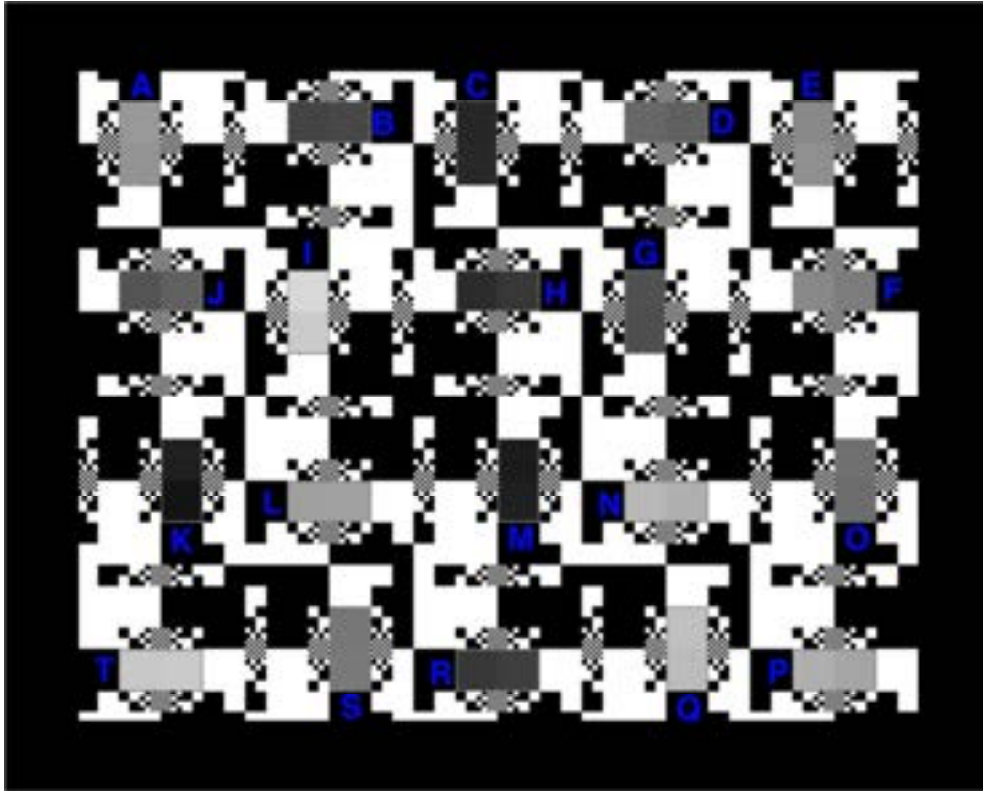


Figura 18: Diapositiva usata per testare i limiti nella percezione della dinamica

Usando due configurazioni, una con diapositiva singola ed una con due diapositive identiche sovrapposte, retro-illuminate da una camera di luce diffusa abbiamo ottenuto due stimoli con una dinamica molto diversa: nel caso della diapositiva singola una dinamica di circa 500:1, mentre per le diapositive sovrapposte una dinamica di circa 250.000:1, come visibile dai dati in tabella 1.

Tabella 1: caratteristiche dello stimolo usato per l'esperimento della percezione della dinamica

Target	Max cd/m ²	Min cd/m ²	Range:1	%Average cd/m ²	O.D. Min	O.D. Max	O.D. Range
Single Contrast	684	1.36	501	50.01%	0.19	2.89	2.70
Double Contrast	441	0.0018	251,189	50.00%	0.38	5.78	5.40

Per valutare quanto di queste dinamiche sia percepibile abbiamo chiesto a numerosi soggetti di stimare la chiarezza dei 40 quadratini grigi ponendoli su una scala da 0 per il più scuro a 100 per il più chiaro. I risultati sono visibili in figura 19.

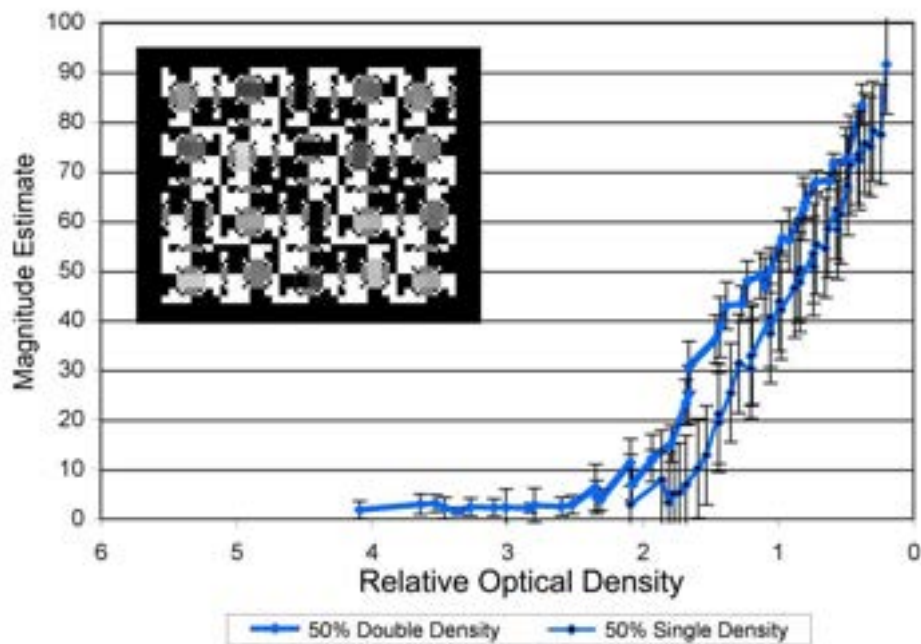


Figura 19: Risultati dell'esperimento sulla percezione della dinamica

Dai risultati mostrati in figura 19 si vede come nella diapositiva singola (riga più sottile a destra) e quindi la dinamica più contenuta, tutti i grigi siano distinguibili, dato che i soggetti hanno assegnato ad essi stime di chiarezza differenti. Nel passare alla diapositiva doppia (riga spessa a sinistra), cioè alla dinamica estesa, di 5.4 unità logarithmiche, la percezione dei grigi più scuri risulta indistinguibile. Solo la metà della dinamica, cioè 2.7 unità logarithmiche risulta distinguibile.

Che questo sia l'effetto dell'abbagliamento si evince analizzando i risultati ottenuti al variare dello sfondo dei grigi. In figura 20 si può vedere come, aumentando la chiarezza dello sfondo, e quindi l'abbagliamento, la dinamica percepita diminuisce (2.0 unità per lo sfondo bianco), mentre al diminuire della luminosità dello sfondo la dinamica aumenta fino a 5 unità logarithmiche per lo sfondo completamente opaco.

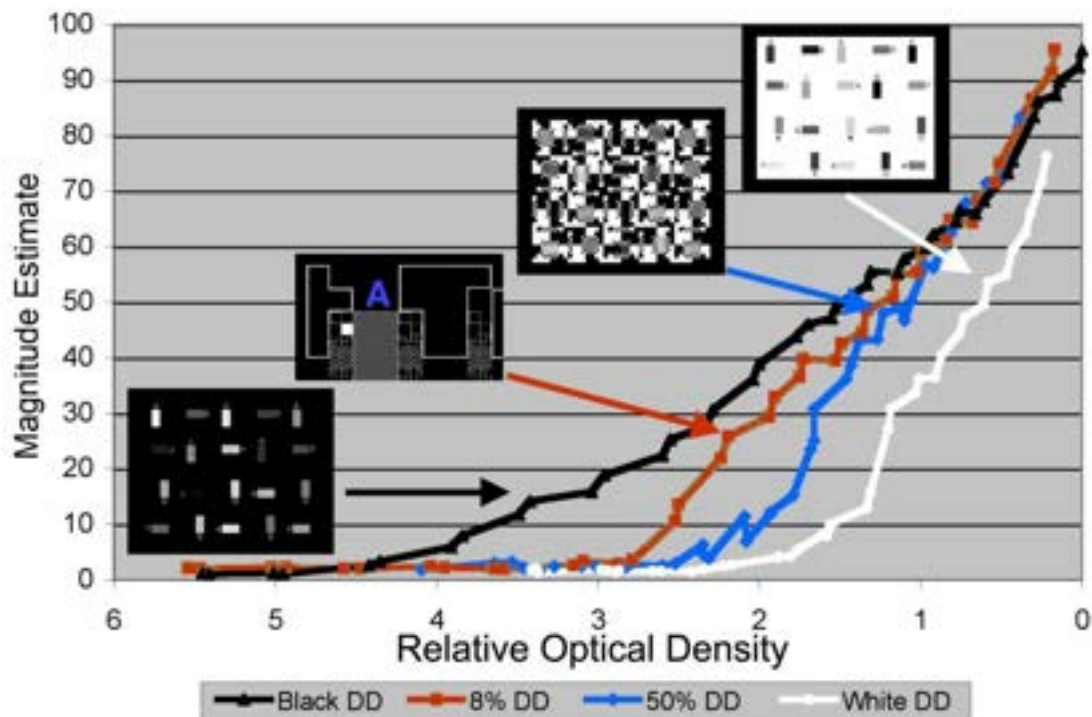


Figura 20: Variare della dinamica percepita al variare dell'abbagliamento

Da questo esperimento emerge che la dinamica della luce è un parametro fondamentale per la valutazione del contrasto e del colore percepiti e come tale dovrebbe essere tenuta in considerazione nella valutazione dell'indice di resa cromatica. Purtroppo il suo inserimento nel calcolo del CRI non è triviale ed a tutt'oggi indici di resa cromatica che considerino anche la dinamica della luce non sono noti agli autori di questo rapporto. Questo parametro avrebbe un'importanza notevole in tutte quelle situazioni in cui si vuole considerare la distribuzione dell'intensità luminosa quali illuminazione di gallerie, illuminazione notturna e stradale, fari di veicoli, etc..

Prima di presentare l'esperimento della prossima sezione, torniamo alle immagini digitali. Recentemente si sono diffuse tecniche per costruire le cosiddette immagini HDR (High Dynamic Range). L'idea è quella di acquisire più scatti per e conservarli in una pila ordinata di immagini per avere diverse esposizioni centrate su zone diverse della dinamica della scena. Un esempio è visibile in figura 21.

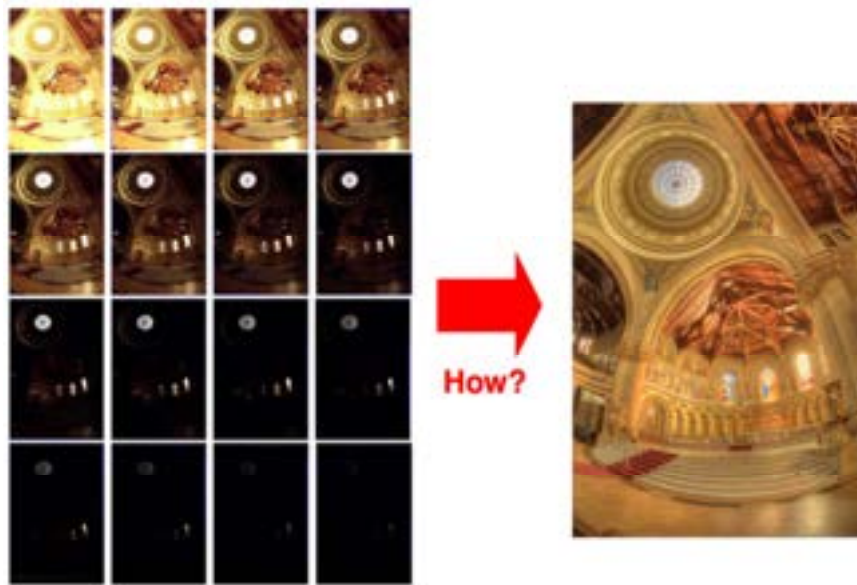


Figura 21: Esempio di immagine ad alta dinamica o HDR

Proprio come illustrato dalla figura 21, si pone il problema di come “mappare” tutte queste varie esposizioni in una unica immagine. Vi sono molti approcci possibili e numerosi algoritmi sono stati sviluppati finora [44]. La nostra proposta è quella di usare un modello computazionale del sistema visivo. Il vantaggio di questo approccio è quello di utilizzare un algoritmo che non dipende dai parametri della scena e che nel “mappare” i toni della scena HDR ne corregge anche eventuali dominanti cromatiche, esattamente come il nostro sistema visivo e come mostrato nell’esempio di Fig. 22.



Figura 22: Esempio di “mappaggio” dei toni ottenuto con un modello computazionale del sistema visivo.

Un modello di questo tipo è in grado di stimare l’apparenza cromatica di una scena anche a partire da immagini a dinamica standard e quindi è un buon candidato per sperimentare l’uso di modelli più completi del sistema visivo per il calcolo del CRI.

3.9 Una sperimentazione per il calcolo del CRI: Eido Index v2

Si tratta di una versione preliminare della nostra proposta. L'idea di base è quella di inserire un modello di apparenza cromatica che tenga conto del contesto della scena osservata. A questo scopo proponiamo l'utilizzo di un modello di computazione spaziale del colore [45] e per questa prima proposta abbiamo scelto l'algoritmo Random Spray Retinex (RSR) [46].

3.9.1 Random Spray Retinex

RSR è un algoritmo di computazione spaziale derivante dalla teoria Retinex di Edwin Land [47]. Questi algoritmi ricalcolano il valore del colore di ogni pixel di una immagine in base al colore dei pixel vicini, poiché come più volte specificato il nostro sistema visivo percepisce il colore di uno stimolo dipende dal contesto in cui viene osservato.

Per ogni pixel di una immagine RSR calcola una nuvola di punti intorno a tale pixel. Tale nuvola viene costruita in modo che sia più densa intorno al pixel considerato (chiamato pixel target), includendo così l'idea di località. Di questi pixel viene considerato quello con i valori R, G, B (considerati separatamente) più alti. Questa terna formano il bianco locale.

Di seguito vengono descritte le formule implementate nell'algoritmo.

Per ogni pixel p_t dell'immagine I dove p_t indica il valore del pixel, si calcola uno spray S composto di M pixel, che sarà quindi della forma $S = \{p_1, \dots, p_j, \dots, p_M\}$.

Si estrae quindi il valore massimo $S_i^{\max}$ dello spray: $S_i^{\max} = \max_{p_j \in S}(p_j)$

Per evitare che si generi rumore nell'immagine, il procedimento viene ripetuto N volte, quindi sarà necessaria una media finale. Alla fine, si ricalcola ogni pixel dell'immagine (in maniera indipendente sui tre canali) con la seguente formula:

$$p_{new} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p_t}{S_i^{\max}}$$

dove p_{new} è il valore finale del pixel target p_t e $S_i^{\max}$ è il massimo valore trovato all'interno dell' i -esimo spray S_i .

3.9.2 Eido Index v2

L'algoritmo RSR vuole input una immagine digitale. Nel nostro caso viene costruita una immagine sintetica del Macbeth Color Checker (MCC). Conoscendo lo spettro di ogni patch del MCC, e lo spettro delle due illuminanti (test e riferimento), si costruiscono due immagini spettrali del MCC osservate sotto le due differenti illuminanti. A questo punto è possibile trasformare lo spettro di ogni punto dell'immagine in un valore di tristimolo XYZ e quindi in RGB.

Il risultato consiste nell'avere due immagini RGB sintetiche del Macbeth Color Checker, che possono essere date in input all'algoritmo di computazione spaziale, RSR nel caso specifico. Questo modo di procedere sostituisce la fase di trasformazione cromatica (von Kries, Bradford, CAT02 etc..).

Gli output dell'algoritmo sono due immagini RGB filtrate, che possono essere ritrasformate in XYZ e poi nello spazio CIELAB dove è possibile calcolare la differenza cromatica di ogni pixel usando la formula

CIEDE2000. Inoltre, è stata implementata una funzione con lo scopo di penalizzare le temperature colore estreme.

Infine, il calcolo del singolo CRI per ogni patch si basa sull'equazione:

$$EI_i = 100 - k * CIE\Delta E2000_i$$

La costante k è pari a 7, ed è stata scelta per avere consistenza con la maggior parte degli altri CRI, per i quali l'indice resa cromatica dell'illuminante F4 vale 51.

Per migliorare i risultati di questa proposta verranno apportate modifiche in futuro, tenendo in considerazione ulteriori test, basati sulla percezione umana.

4. Un primo esperimento sulla resa visiva di sorgenti di luce⁷

4.1 Introduzione

Scopo di questo esperimento è confrontare l'indice di resa cromatica con la valutazione della capacità dell'illuminante di mantenere il colore degli oggetti (metamerismo dell'illuminante). Al test hanno partecipato 9 osservatori.

Sono state costruite due "light booth" di dimensioni 36x36x46 cm con la possibilità di posizionare all'interno una sorgente di luce. Entrambe le camere sono internamente dipinte di bianco. Nella prima camera è alloggiata la sorgente di luce di riferimento (quindi una sorgente di luce con un CRI prossimo a cento), nella seconda la luce che si vuole testare.

Al fine di confrontare le due sorgenti di luce, la temperatura colore di queste è scelta in modo da essere il più possibile simile.

Sul fondo dei due light booth è posto in ciascuno un Macbeth Color Checker. Una immagine del setup sperimentale è visibile in figura 23.

⁷ Questo esperimento si è svolto nella precedente annualità. Viene qui riportato in quanto propedeutico all'esperimento dell'annualità presente



Figura 23: il setup sperimentale per il primo esperimento: Sono visibili i due light booth contenenti ciascuno un Macbeth Color Checker.

L'esperimento è svolto in un ambiente completamente buio, dopo opportuno adattamento del sistema visivo dell'osservatore.

Agli osservatori è chiesto di valutare le differenze di colore di ogni patch del Color Checker, osservate sotto la sorgente di riferimento e sotto la sorgente di test. Attraverso un questionario, descritto in seguito, viene rilevato il grado di apparenza di preservazione del colore.

4.2 Sorgenti di luce

Per lo svolgimento di questo test sono state utilizzate le 6 sorgenti di luce visibili in tabella 2.

In particolare il test è stato diviso in due. Nel primo step è stata usata come sorgente di riferimento la lampadina al tungsteno, e sono state testate la lampadina fluorescente, e la lampada alogena da 70W. Nel secondo, per poter testare le strisce LED con una sorgente luminosa di intensità paragonabile è stata usata come sorgente di riferimento la lampadina alogena da 18W.

Tabella 2: Sorgenti di luce usate nell'esperimento. Le due sorgenti evidenziate sono le sorgenti scelte come riferimento.

	CCT	CRI	EV
tungsteno	2929	99	13.1
fluorescente	2870	83	12.1
alogena 70 W	2977	99	12.6
alogena 18 W	2736	99	10.0
Led	2760	56	10.3

Per testare le strisce LED con una sorgente luminosa di intensità paragonabile è stata usata come sorgente di riferimento la lampadina alogena da 18W.

Con un esposimetro (Minolta Spotmeter) è stata calcolata l'intensità luminosa proveniente dalle patch bianche e all'interno delle light booth, sotto le varie sorgenti di luce (vedi tabella 2).

4.2 Descrizione dell'esperimento

All'esperimento hanno partecipato 9 osservatori. Ad essi è stato chiesto di valutare le differenze di colore di ogni patch del Color Checker (per un totale di 24 patch), osservate sotto la sorgente di riferimento e sotto la sorgente di test. La comparazione avveniva dopo un periodo di adattamento, non aveva limiti di tempo e all'osservatore era concesso di spostare l'attenzione da un booth all'altro senza limitazioni.

Il confronto avveniva in due momenti: in prima istanza l'osservatore valuta qualitativamente la differenza cromatica tra le due patch osservate sotto le due sorgenti di luce secondo la seguente scala:

- le patch sono identiche
- le patch sono simili
- le patch sono differenti
- le patch sono molto differenti
- le patch sono completamente differenti

In un secondo momento l'osservatore valuta quantitativamente le differenze, in una scala da 1 a 100, secondo la seguente suddivisione suggerita:

- le patch sono identiche: (100)
- le patch sono simili: (80-99)
- le patch sono differenti (50-79)
- le patch sono molto differenti (1-49)
- le patch sono completamente differenti (0)

Vogliamo qui sottolineare che dei 9 osservatori uno è stato scartato in quanto i valori riportati erano assolutamente fuori dalla media. Il soggetto ha dato prova di non aver compreso il compito.

I CRI calcolati sono mostrati in tabella 3.

Tabella 3: Elenco dei CRI calcolati a partire dagli spettri delle lampade in osservazione. L'ultima riga della tabella riporta il CRI calcolato dagli osservatori.

Color Rendering Index	Sigla	fluoresc.	alogena	led
CIE CRI 8 patch (Munsell), senza adattamento:	CRI 8 SA	84	98	58
CIE CRI 8 patch (Munsell), con adattamento:	CRI 8 CA	83	99	58
CIE CRI 14 patch (Munsell), senza adattamento:	CRI 14 SA	80	98	59
CIE CRI 14 patch (Munsell), con adattamento:	CRI 14 CA	79	99	59
CRI00 8 patch (Munsell):	CRI00 8	78	99	60

Color Rendering Index	Sigla	fluoresc.	alogena	led
CIE00 10 patch (Macbeth CC):	CRI00 10	79	99	61
CIE R96a (8 Macbeth CC + 2 skin tones):	R96a	72	97	61
CIE R96_TCC_LAB (8 Macbeth CC + 2 skin tones):	R96_TCC	78	97	64
eido_index_v2 (24 Macbeth CC):	EI	76	94	57
eido_index_v2 senza penalità:	EI SP	81	99	61
media osservatori 24 patch	Obs	87	92	80

Per una maggiore chiarezza riportiamo di seguito (figure 24-26) i grafici dei valori dei vari CRI, per le singole sorgenti di luce, confrontabili col dato percettivo degli osservatori (Obs) posto per ultimo.

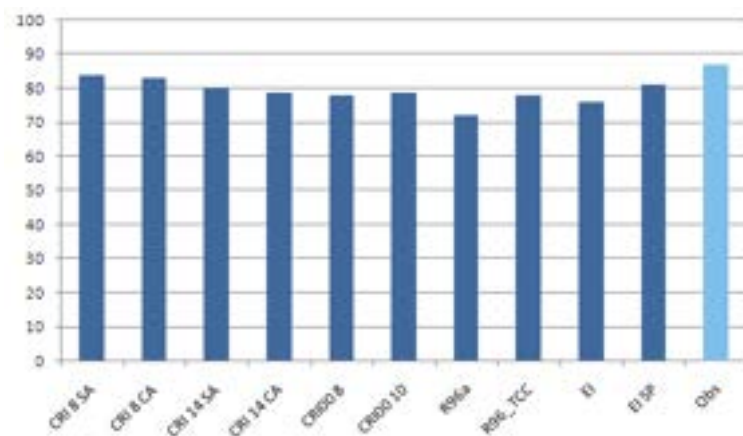


Figura 24: dati relativi alla sorgente di luce fluorescente

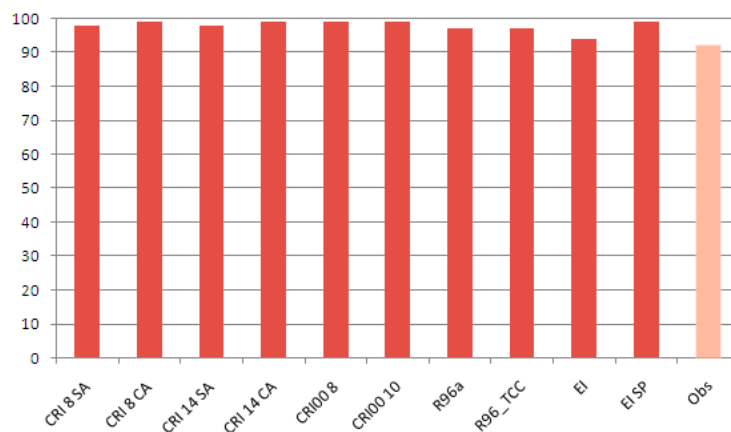


Figura 25: dati relativi alla sorgente di luce alogena da 70 W

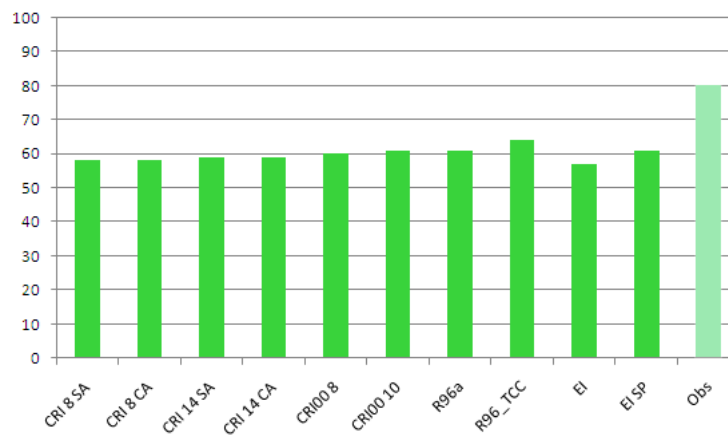


Figura 26: dati relativi alle sorgenti di luce “strisce LED”

Infine, riportiamo i risultati su un singolo grafico per poterli confrontare meglio (figura 27):

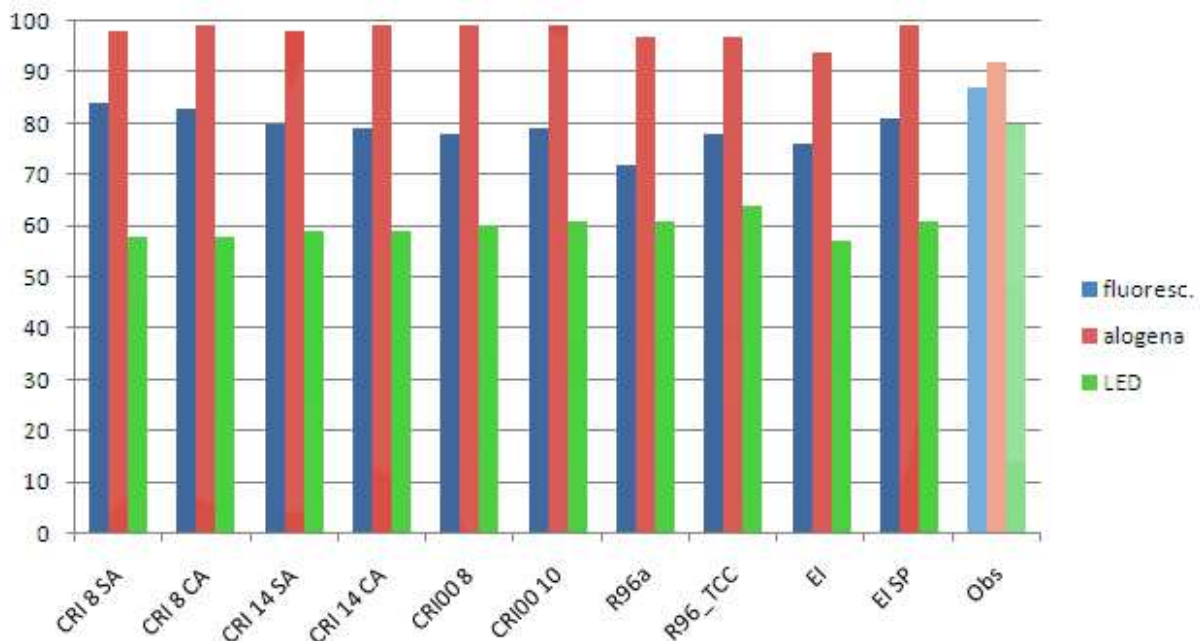


Figura 27: confronto dei punteggi ottenuti dalle varie sorgenti di luce.

Dai grafici si nota che la luce alogena, avendo uno spettro continuo molto simile alla sorgente di riferimento (luce al tungsteno), ottiene punteggi molto alti in tutti i metodi CRI testati. Gli esperimenti con gli osservatori sono in linea con tali risultati, sebbene il punteggio sia lievemente inferiore. Per quanto riguarda la luce fluorescente, tutti gli indici calcolano un punteggio intorno agli 80, tranne R96a, (che risulta pari a 72). Questo è probabilmente dovuto al fatto che la sorgente di riferimento viene scelta da un insieme di sei, prendendo quella con temperatura colore più vicina. Si noti che la valutazione dell'osservatore è

leggermente più alta (87) di tutti gli indici calcolati (lo standard CRI con 8 patch senza adattamento è quello che si avvicina di più con un indice pari a 84). Infine per quanto riguarda i led, i vari indici di resa cromatica danno un risultato che si aggira intorno al 60, un punteggio molto più basso di quello che viene percepito dagli osservatori umani (80), confermando così l'inadeguatezza dell'approccio classico dei vari CRI nei confronti delle nuove sorgenti LED.

5. Un secondo esperimento sulla resa visiva di sorgenti di luce

5.1 Introduzione

In questa sezione viene descritto l'esperimento svoltosi nel mese di Maggio 2012 che ha coinvolto 96 studenti di quattro classi (3° geometri, 1° B liceo scientifico, 2° B liceo scientifico, 3° D liceo scientifico) della scuola secondaria ISIS "Edith Stein" di Gavirate (VA).

Scopo della ricerca è stato esaminare come sorgenti di luce di tipo differente avessero una diversa resa visiva dei colori degli oggetti. L'esperimento in questione nasce come estensione dell'esperimento mostrato nella sezione precedente.

L'esperimento sintetizza (nel senso di riproduce in maniera artificiale) i calcoli matematici del Color Rendering Index (CRI). Il CRI calcola le differenze visive di due patch identiche osservate sotto illuminanti diverse. Il procedimento è ripetuto per un certo numero di patch ed infine viene calcolata una media. Il risultato viene sottratto a 100 ed è un numero che indica quanto una certa illuminante preservi la resa visiva dei colori, con lo scopo di misurare la bontà di una illuminante.

In questo esperimento il confronto non viene fatto in termini matematici ma da osservatori umani. L'interesse per questo esperimento non è solo per il gran numero di osservatori coinvolti, ma anche per lo studio effettuato su una scena a tre dimensioni, piuttosto che solamente bidimensionale. Costruire una scena 3D comporta introdurre ombre e inter-riflessioni, che si creano a causa delle geometrie coinvolte, in modo da rispecchiare quello che succede nella realtà.

Gli esperimenti svolti sono quindi due: nel primo vengono calcolate le differenze tra patch corrispondenti di due Macbeth Color Checker osservati sotto una luce di riferimento e una luce test. Il secondo esperimento implica l'utilizzo di quattro costruzioni LEGO™ identiche. In questo caso sono state calcolate le differenze di colore di sei mattoncini colorati.

Le modalità con cui si sono svolti gli esperimenti sono riportate di seguito.

5.2 Set-up degli esperimenti

Sono stati costruiti 4 box di legno di dimensione 1m x 1m x 0.8m. L'interno di ogni box era ricoperto di carta bianca. La parte superiore frontale del box è stata schermata con un pannello, in modo che la luce non colpisse direttamente gli occhi degli osservatori.

I box sono disposte spazialmente in questo ordine: BOX 1 – BOX RIFERIMENTO – BOX 2 – BOX 3.

In ogni test box erano alloggiare due lampadine, di cui solo una alla volta era accesa.

Sono stati svolti due esperimenti, in entrambi i casi lo scopo era comparare dei campioni di colore, osservati sotto una luce di riferimento e sotto una luce test. Nel primo caso si trattava di oggetti bidimensionali, nel secondo di oggetti tridimensionali. Viene usato un questionario per quantificare il grado di conservazione del colore percepito dagli osservatori.

Gli esperimenti si sono svolti in una stanza quasi completamente buia, i livelli di illuminazione non erano comunque tali da compromettere la buona riuscita dell'esperimento.

Sono state testate sei lampade: 3 fluorescenti, una alogena, e due sorgenti LED (maggiori dettagli in tabella 4).

Nell'esperimento sono state coinvolte quattro classi di studenti di una scuola secondaria, per un totale di 96 studenti, divisi in 30 femmine e 66 maschi, con un'età compresa tra i 14 e 18 anni.

Tuttavia si è reso necessario eliminare parte dei dati, perché incompleti o perché ritenuti non affidabili, e pertanto non validi ai fini statistici.

Non c'erano limiti di tempo per svolgere l'esperimento.

Tabella 4: Elenco e descrizione delle sette lampade usate durante l'esperimento, B1S1 indica che la lampada era posizionata nel BOX 1, e definita come sorgente 1. Ogni test BOX conteneva due sorgenti di luce.

Posizione	B1S1	B2S1	B3S1	Rif.	B1S2	B2S2	B3S3
Modello	VIVA Eko st2	CENTURY Microspirale	Sylvania Minilinx	OSRAM Halogen Classic b es	OSRAM Parathom Classic a40	CENTURY Goccia Multiled	PHILIPS Master Classic
Potenza (W)	20	11	11	42	8	3	30
Flusso (lm)	1250	650	600	630	345	270	806
CCT	2700	6400	4000	2500-2700	3000	2700	2700-3000
Tipo	Fluo. Compatta (CFL-i)	Fluo. Compatta (CFL-i)	Fluo. Compatta (CFL-i)	Alogena	LED	LED	Alogena IRC
Classe	A	A	A	C	A	A	B
Esperimento	LEGO	MCC+LEGO	LEGO	MCC+LEGO	LEGO	MCC+LEGO	LEGO

Posizione B1S1 significa che lampada era posizionata nel box 1 ed era definita come sorgente 1 (poiché in ogni box erano presenti due sorgenti).

Nel grafico seguente (figura 28) sono mostrati i grafici spettrali relativi alle sette sorgenti di luce, misurati con uno spettro radiometro Konica Minolta CS-2000A.

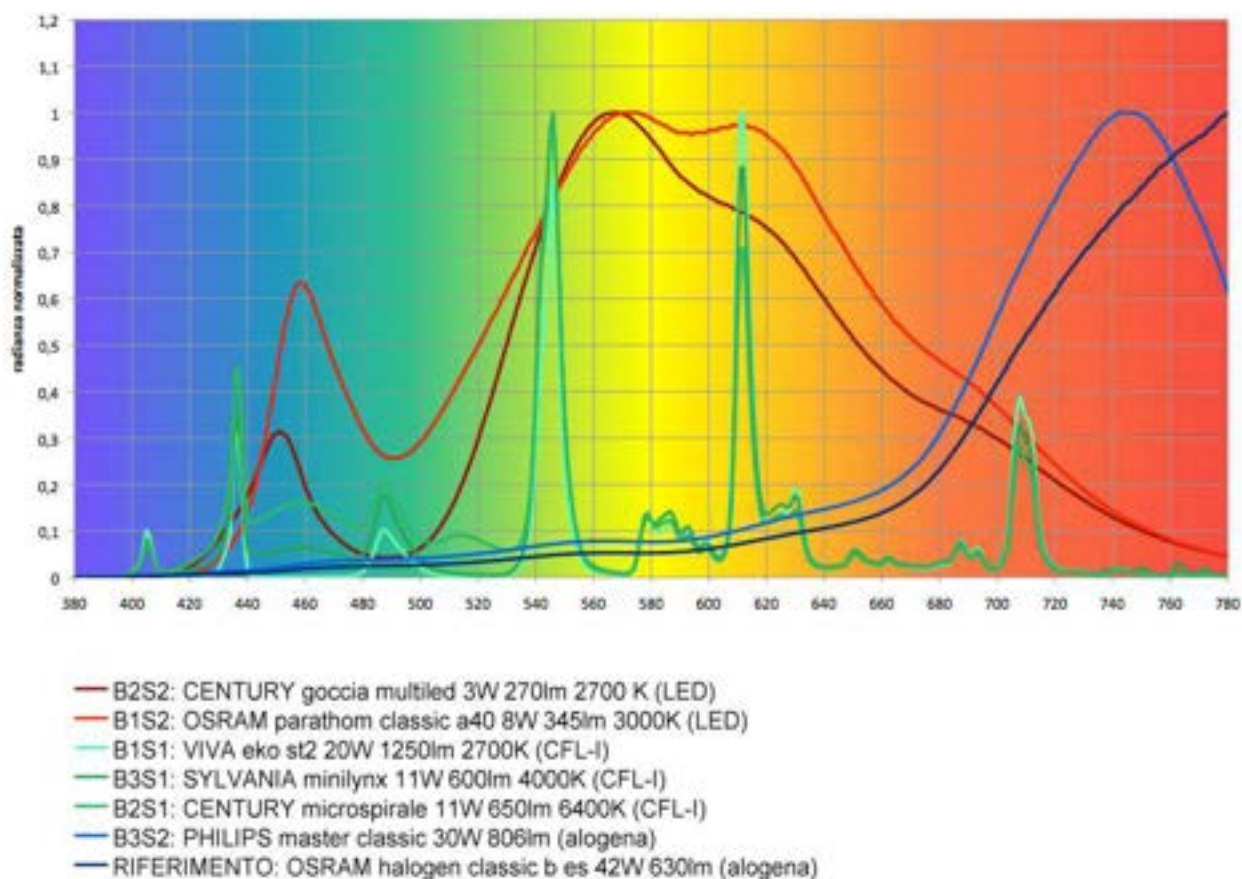


Figura 28: distribuzioni spettrali di potenza delle 7 lampade.

Mostriamo in figura 29 anche le posizioni delle sorgenti di luce sul diagramma di cromaticità xy.

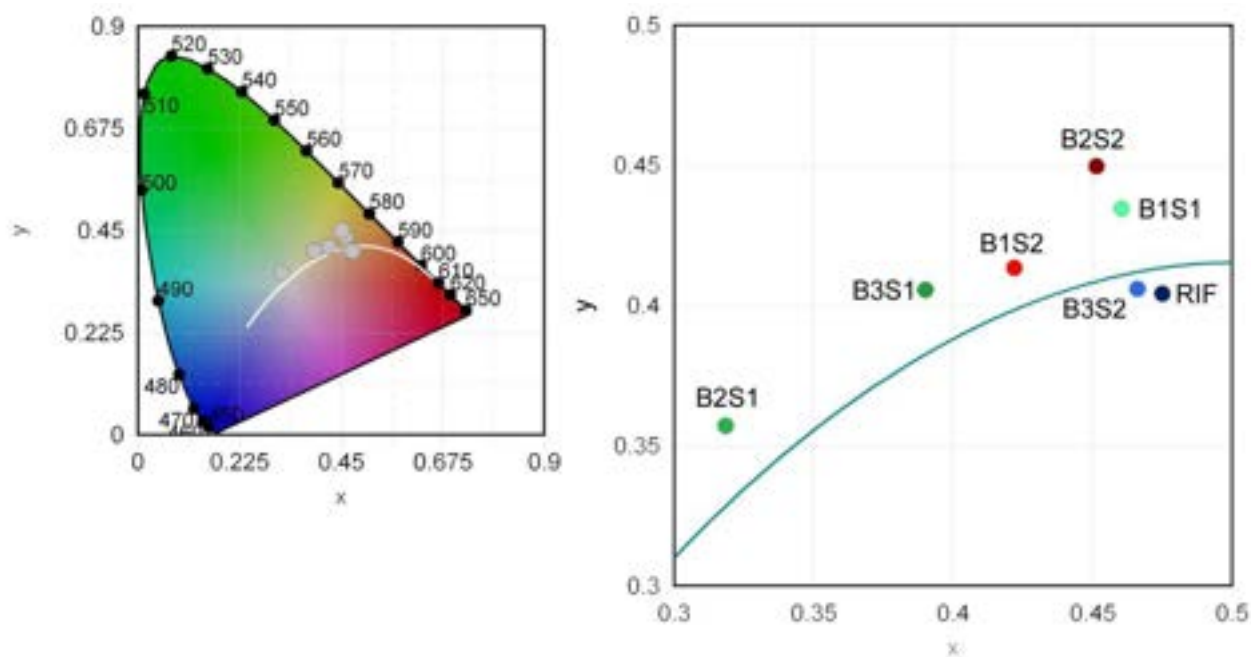


Figura 29: disposizione delle luci sul diagramma di cromaticità.

5.3 Il primo esperimento (Macbeth Color Checker)

Per il primo esperimento sono stati utilizzati per la valutazione due Macbeth Color Checker (figura 30) posti all'interno di due Box.

Nel BOX RIFERIMENTO è posto il primo MCC osservato sotto una lampada alogena con CRI prossimo a 100.

NEL BOX 2 viene posto il secondo MCC. Vengono testate due lampade: una fluorescente (CENTURY Microspirale – B2S1) e una a LED (CENTURY Goccia Multiled – B2S2) (già posizionate entrambe nel BOX 2, ma accesa solo una alla volta). Si noti che B2S1 ha una CCT di 6400 K, molto diversa dalla sorgente di riferimento (2500-2700 K) e da B2S2 (2700 K). Il calcolo del CRI quindi non avrebbe molto senso, in quanto è ben specificato nell'algoritmo che le lampade devono avere una CCT confrontabile. Si sono voluti valutare comunque i risultati dell'esperimento anche in questo caso, poiché grazie al meccanismo di costanza cromatica, il sistema visivo umano è in grado di minimizzare gli effetti di questa differenza di colore della luce.



Figura 30: Rappresentazione del Macbeth Color Checker.

Di seguito (figura 31) il grafico di riflettanza delle 24 patch del Macbeth Color Checker, misurati con lo spettrofotometro Konica Minolta CM 2600d.

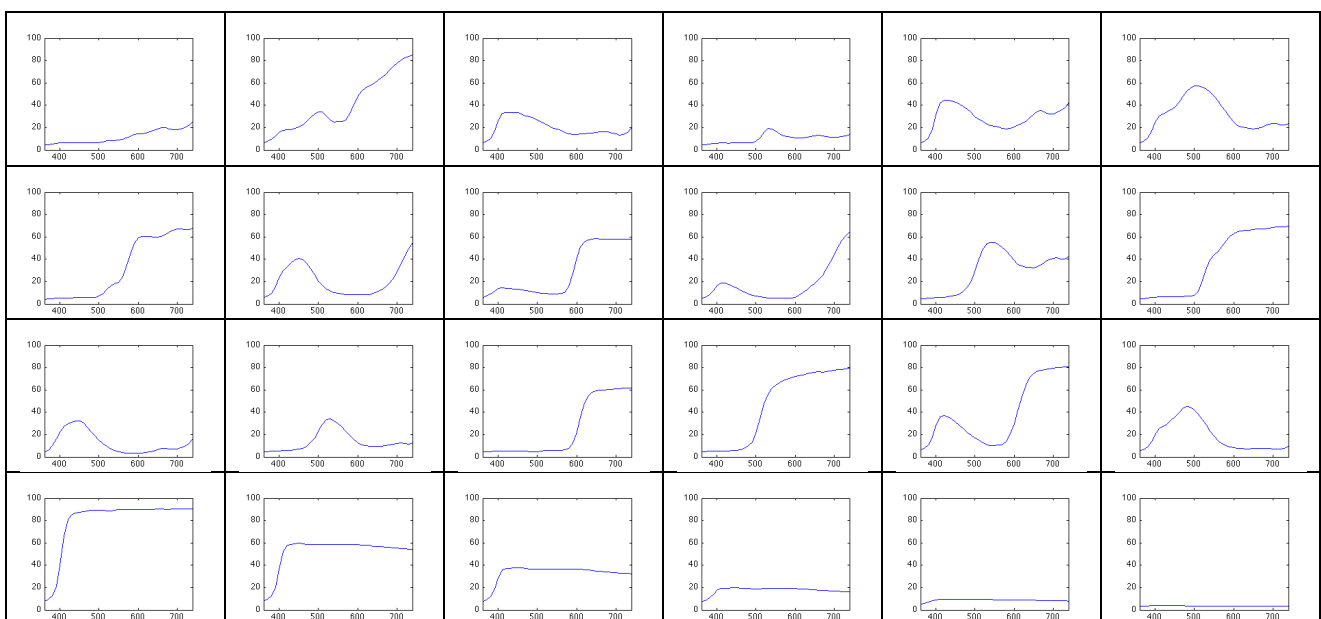


Figura 31: grafici di riflettanza delle 24 patch del Macbeth Color Checker.

5.4 Il secondo esperimento (LEGO™)

Nel secondo esperimento ai Macbeth Color Checker (MCC) sono stati sostituite 4 costruzioni LEGO™ identiche, con lo scopo di introdurre una scena a tre dimensioni (che crea ombre e inter-riflessioni). In questo caso agli osservatori è chiesto di osservare sei mattoncini colorati (arancione, verde, bianco, blu, giallo, rosso) che fanno parte della costruzione. I mattoncini scelti per la valutazione così come la costruzione sono visibili in figura 32.

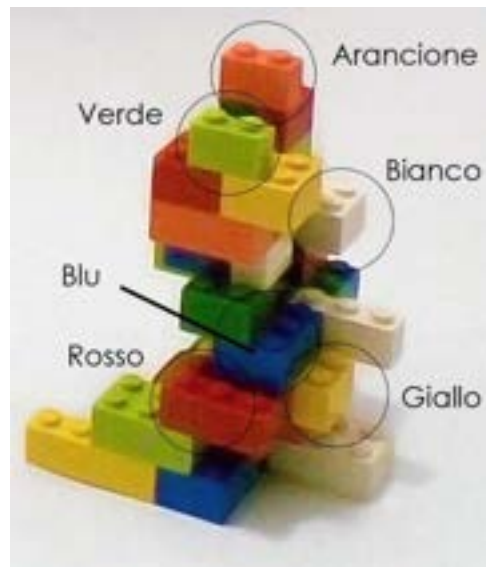


Figura 32: Costruzione LEGO usata per il secondo esperimento. I cerchi indicano i mattoncini presi in considerazione per l'osservazione.

La figura 33 mostra i grafici di riflettanza dei sei mattoncini LEGO™ misurati con lo spettrofotometro Konica Minolta CM 2600d.

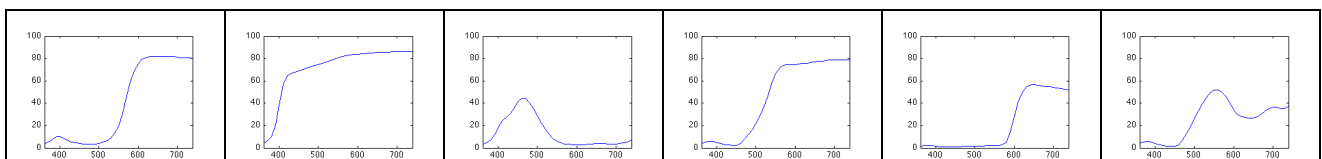


Figura 33: spettri di riflettanza: arancione, bianco, blu, giallo, rosso, verde.

5.5 Il questionario

Il questionario consegnato agli osservatori richiedeva:

- dati personali (Iniziali di nome e cognome, sesso, età, colore degli occhi, classe frequentata, eventuali problemi di vista, e uso di lenti o occhiali durante l'esperimento)
- valutazione delle differenze per ogni coppia di colori. In particolare è stato proposto un approccio a due fasi, prima una valutazione qualitativa, ed in un secondo momento l'assegnazione di un punteggio quantitativo, secondo la tabella 5 mostrata di seguito:

Tabella 5: il metodo di valutazione delle patch richiesto agli osservatori.

<i>le patch (sotto sorgente-test e sorgente-riferimento):</i>	<i>valutazione</i>	<i>punteggio</i>
sono identiche	ID	100
hanno una differenza appena percettibile	DAP	80-99
sono differenti	DIF	50-79
sono molto differenti	MD	1-49
sono completamente diverse	CD	0

Per il Macbeth Color Checker la tabella da riempire era della forma mostrata in figura 34. Era costituita quindi dallo stesso numero di celle e con la stessa disposizione del MCC, in modo da scrivere il risultato nella corrispondente casella.

Figura 34: rappresentazione della tabella data agli osservatori, da riempire con le valutazioni riguardanti le 24 patch del MCC.

Per quanto riguarda la valutazione della costruzione LEGO TM la scheda si presentava nella seguente forma (figura 35):

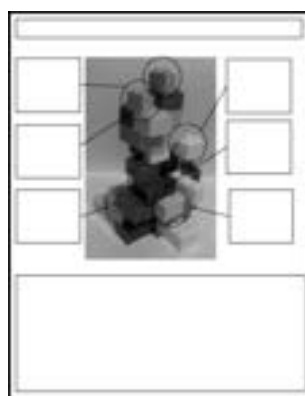


Figura 35: scheda consegnata agli osservatori riguardante la valutazione delle costruzioni LEGO (TM)

5.6 Statistiche dei risultati

96 studenti hanno partecipato all'esperimento. Tuttavia una prima eliminazione dei dati è stata effettuata a causa di dati incompleti o mancanti. In questo modo, il numero dei partecipanti con dati validi si è ridotto a 80.

Purtroppo non tutti i risultati sono affidabili allo stesso modo. In primo luogo, la quasi totalità degli studenti ha saltato la valutazione qualitativa decidendo subito il punteggio da assegnare al confronto tra le patch test. Lo scopo della valutazione qualitativa è aiutare nella scelta del punteggio numerico. Si riporta

l'esempio di uno studente che ha assegnato un punteggio pari a zero a 15 patch del MCC. Secondo lo studente le patch risultano quindi *completamente differenti*. La scala di valutazione di questi studenti era quindi evidentemente diversa rispetto a quella degli altri osservatori. Si è deciso quindi di eliminare i risultati degli studenti che contenessero almeno uno zero nei propri confronti. In questo modo il numero dei partecipanti con dati validi è sceso a 48 (esattamente la metà del numero di partenza).

Inoltre quasi tutti gli studenti hanno dato i punteggi in forma di decina (70-80-90) o al più di cinquina (85-90-95)⁸.

Di seguito mostriamo i risultati nei due casi (con eliminazione dei dati incompleti e con eliminazione dei dati non affidabili).

5.7 Risultati del primo esperimento

Seguono i risultati dell'esperimento riguardante il Macbeth Color Checker. I dati utilizzati sono quelli definiti eliminando sia i dati incompleti che quelli considerati inattendibili. In totale si tratta dei dati di 48 studenti. Sono inoltre riportate le medie anche considerando i dati non attendibili (quindi degli 80 studenti).

Il primo MCC era posto nella Box 2 e illuminato dalla sorgente 1 (B2S1), una lampada fluorescente Century a microspirale (a 6400 K contro i 2700 K della sorgente di riferimento). In tabella 6 (che segue la disposizione delle patch del Macbeth Color Checker) sono riportate le medie per le singole patch colorate.

Tabella 6: Medie delle valutazioni per singole patch

Dark skin 71.3	Light skin 64.9	Blue sky 65.6	Foliage 61.6	Blue flore 52.8	Bluish green 61.3
Orange 71.7	Purplish blue 63.5	Moderate red 57.2	Purple 59.2	Yellow Green 66.4	Orange yellow 57.2
Blue 79.4	Green 84.2	Red 72.5	Yellow 74.1	Magenta 55.9	Cyan 65.1
White 90.6	Neutral 8 86.6	Neutral 6.5 86.4	Neutral 5 88.8	Neutral 3.5 91.7	Black 98.3

La media totale dei dati è 71.93.

Per quanto riguarda i dati tenendo conto di quelli considerati non affidabili la media totale scende a 65.41.

Gli stessi risultati sono mostrati in forma grafica nella seguente figura 36 (per una più semplice interpretazione i colori delle barre simulano il colore delle patch):

⁸ questo fatto dipende probabilmente dal fatto che gli studenti sono abituati alla scala dei voti scolastici, che va da zero a dieci, e che quindi la scala 0-100 è stata interpretata in quel modo

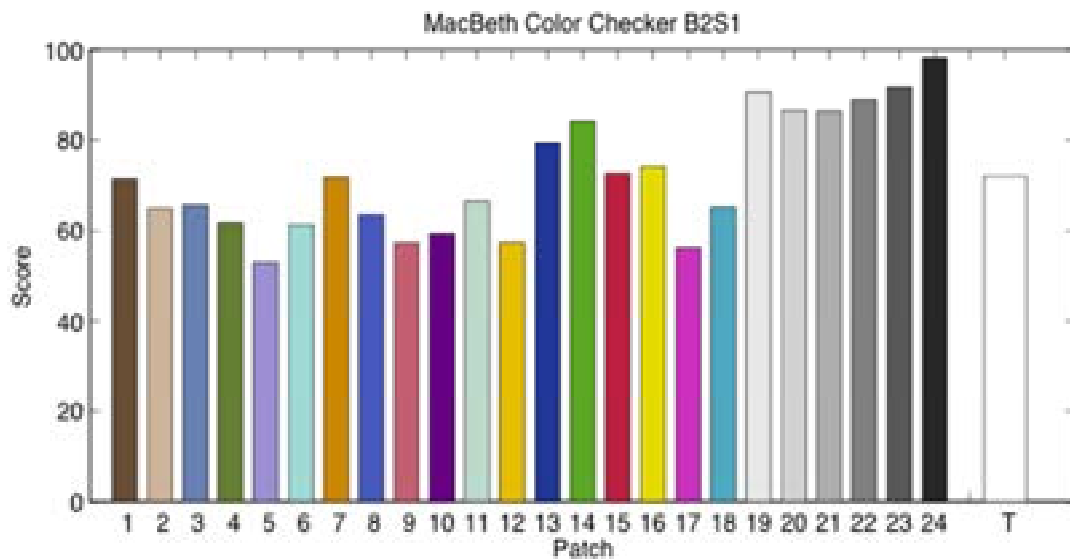


Figura 36: dati riguardanti la valutazione del primo Macbeth Color Checker.

Di ogni patch è stato poi calcolato l'istogramma (figura 37, in ascissa: il possibile punteggio 0-100, in ordinata: il numero di occorrenze per ogni punteggio).

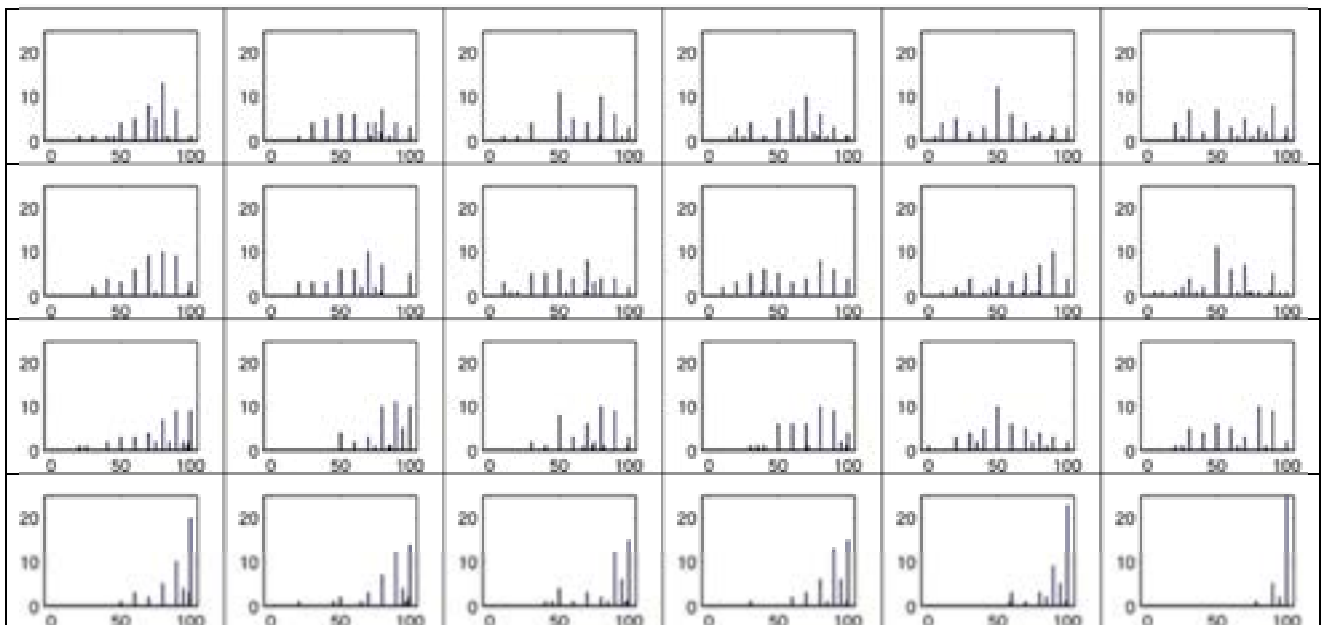


Figura 37: istogrammi delle 24 patch del MCC.

I dati mostrati sopra possono essere approssimati alle decine (cioè un valore 87 diventata 90), questo è giustificato dal fatto che la maggior parte degli studenti ha usato dei voti "a decina", piuttosto che considerare le unità. Di conseguenza i grafici disegnati in questo modo (figura 38) risultano più leggibili in quanto meno dispersivi.

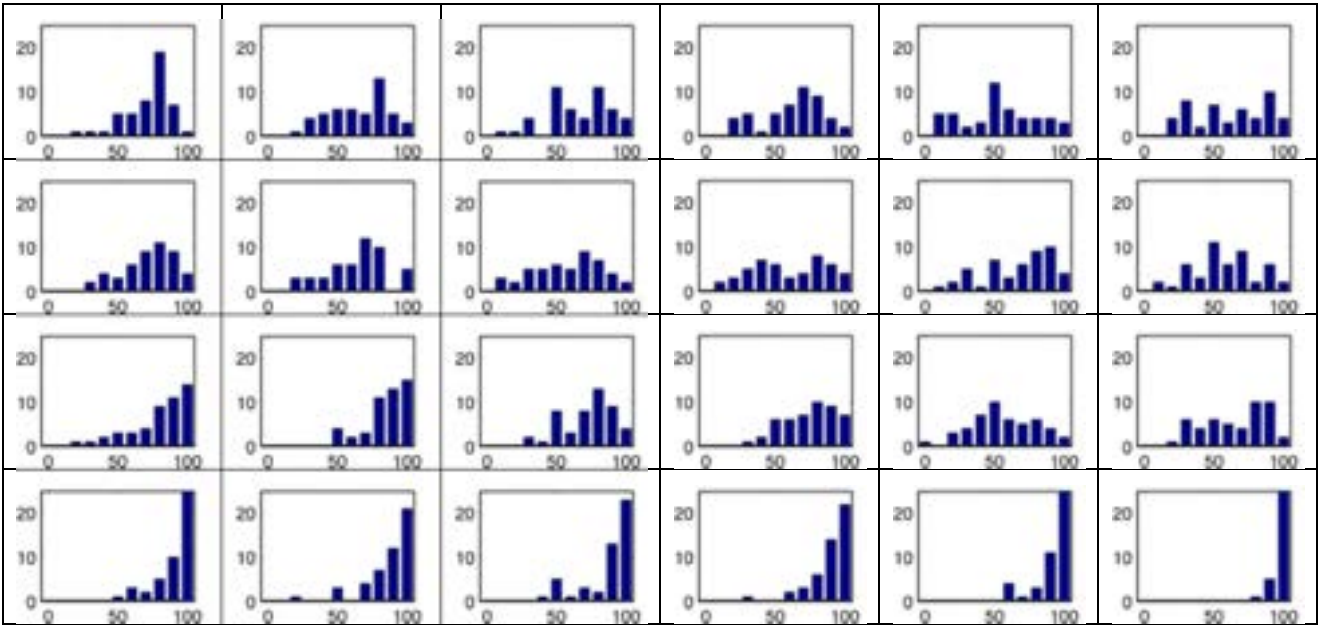


Figura 38: istogrammi delle patch approssimati alla decina.

Vengono ora mostrati i dati riguardanti la seconda sorgente di luce che illuminava il MCC (B2S2). In questo caso si tratta di una sorgente a LED (Century Goccia Multiled, 2700 K).

In tabella 7 sono riportate le medie per singole patch. La media totale ha valore 80.04. In figura 39 sono riportati i grafici dei dati. (In questo caso la media utilizzando tutti i dati è 75.54)

Tabella 7: medie delle singole patch per il secondo esperimento con il Macbeth Color Checker.

Dark skin	Light skin	Blue sky	Foliage	Blue flore	Bluish green
71.4	64.0	88.8	89.1	77.0	85.3
Orange	Purplish blue	Moderate red	Purple	Yellow Green	Orange yellow
60.4	83.6	69.3	79.2	83.2	56.5
Blue	Green	Red	Yellow	Magenta	Cyan
87.5	88.8	71.5	68.1	65.0	81.2
White	Neutral 8	Neutral 6.5	Neutral 5	Neutral 3.5	Black
85.5	91.2	90.9	91.7	93.5	98.1

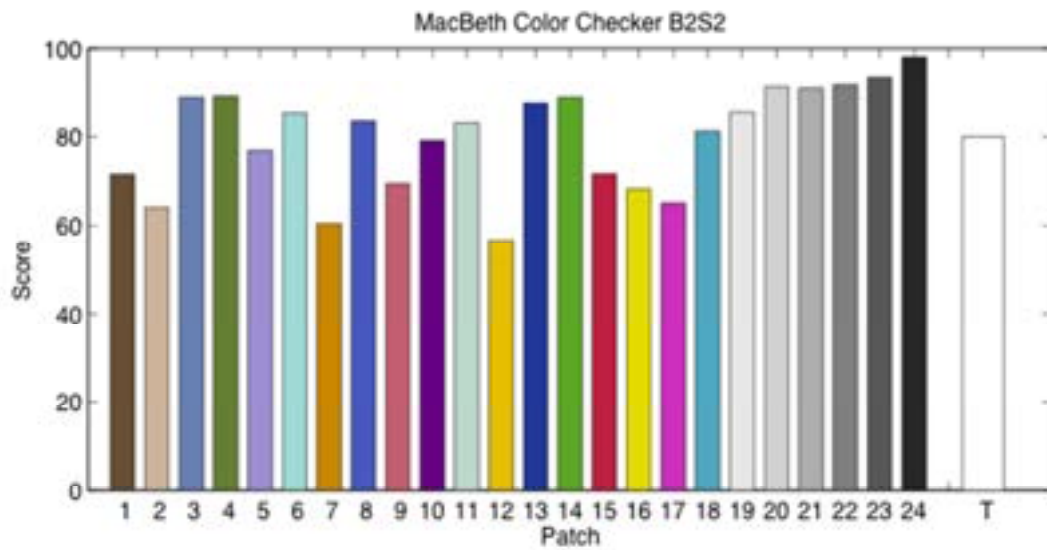


Figura 39: grafico dei risultati dell'esperimento con il secondo Macbeth Color Checker.

Anche in questo caso è possibile calcolare gli istogrammi per le singole patch (si veda figura 40)

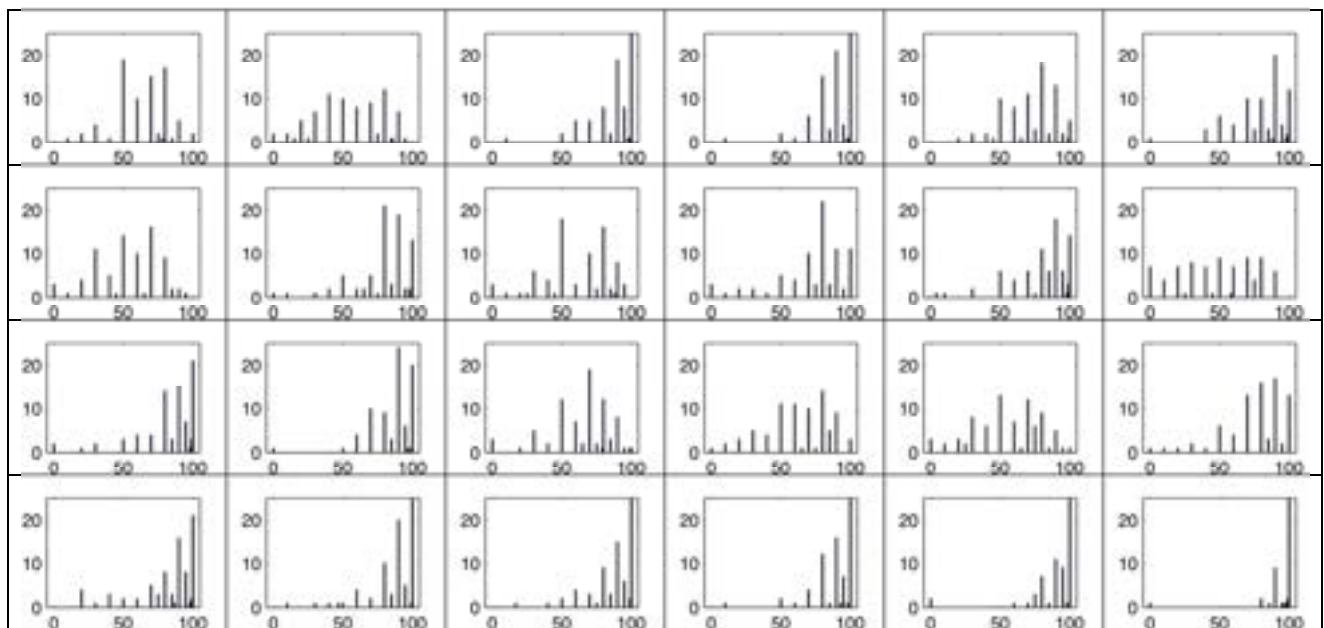
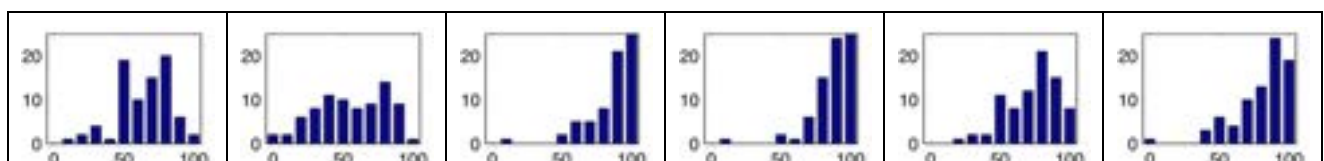


Figura 40: istogrammi relativi al secondo esperimento per le singole patch del Macbeth Color Checker.

Di nuovo, per maggiore leggibilità, riportiamo i dati approssimati alla decina (figura 41).



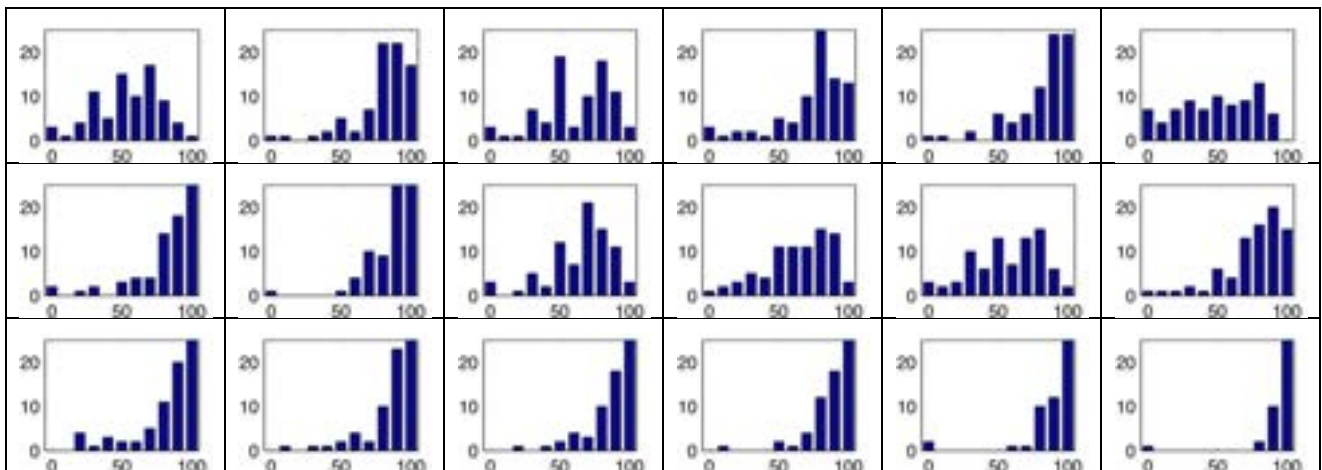


Figura 41: istogrammi approssimati alle decine.

Si è inoltre disegnato un grafico confrontando le medie delle singole patch per i due Macbeth Color Checker osservati sotto le due diverse sorgenti di luce (figura 42)

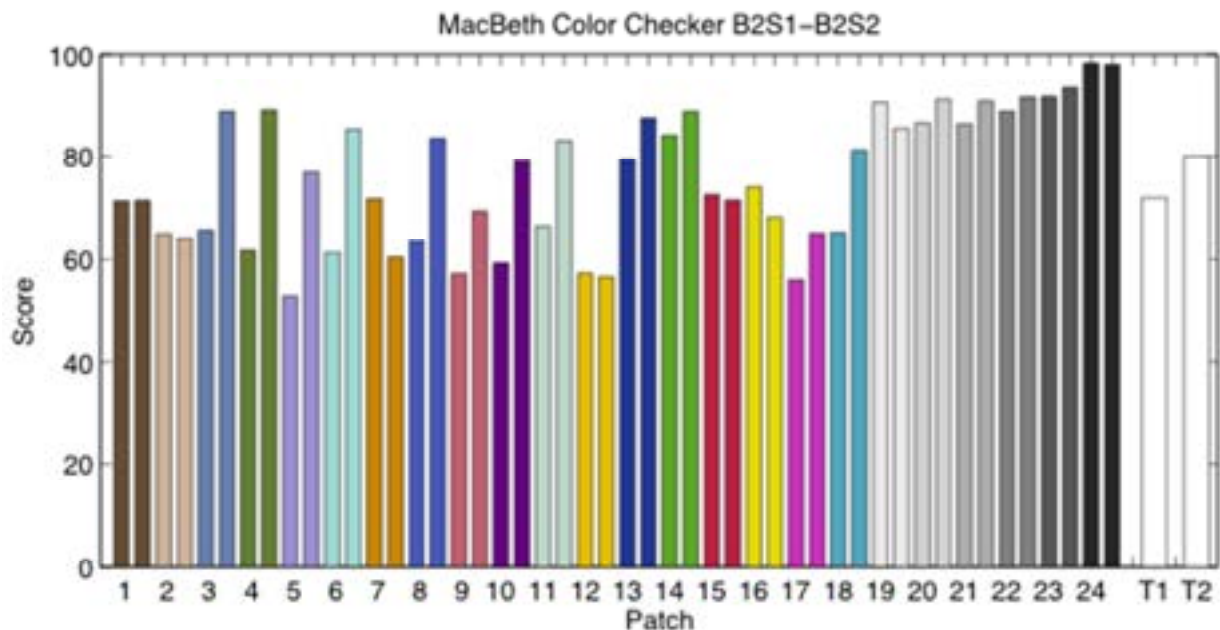


Figura 42: confronto delle medie delle singole patch. La prima colonna di ogni coppia corrisponde alla media della valutazione della patch del primo Macbeth Color Checker (B2S1), la seconda colonna corrisponde alla valutazione del secondo MCC (B2S2).

In questo modo è possibile osservare per quali patch vi è una notevole differenza visiva quando osservati con le diverse lampade. Si noti come le patch 3-4-5-6-8-9-10-11-18 abbiano una valutazione molto maggiore quando osservate sotto la sorgente 2 rispetto a quando osservate sotto la sorgente 1. Inoltre si può vedere come le patch giallo-arancioni (7-12-16) ricevano invece valutazione migliore se osservati sotto la sorgente 1. Questi risultati hanno senso in quanto la sorgente 1 ha una temperatura colore di 6400 K, risultando quindi una luce “fredda”, mentre la sorgente 2 è di 2700 K. I verdi e gli azzurri vengono quindi resi diversamente dalle due sorgenti, in particolare si avvertiranno maggiormente le differenze con la sorgente di riferimento. Con la sorgente 2 invece, che ha una CCT molto vicina a quella di riferimento si ha

in generale una migliore corrispondenza dei colori (la media totale è di circa 80 contro i circa 72 della sorgente 1).

5.8 Risultati del secondo esperimento

Per lo svolgimento del secondo esperimento si è fatto uso di quattro costruzioni LEGO TM identiche, posizionate (orientate allo stesso modo) in quattro light box, tre delle quali contenente ciascuna due sorgenti di luce da testare, mentre la quarta conteneva la luce di riferimento.

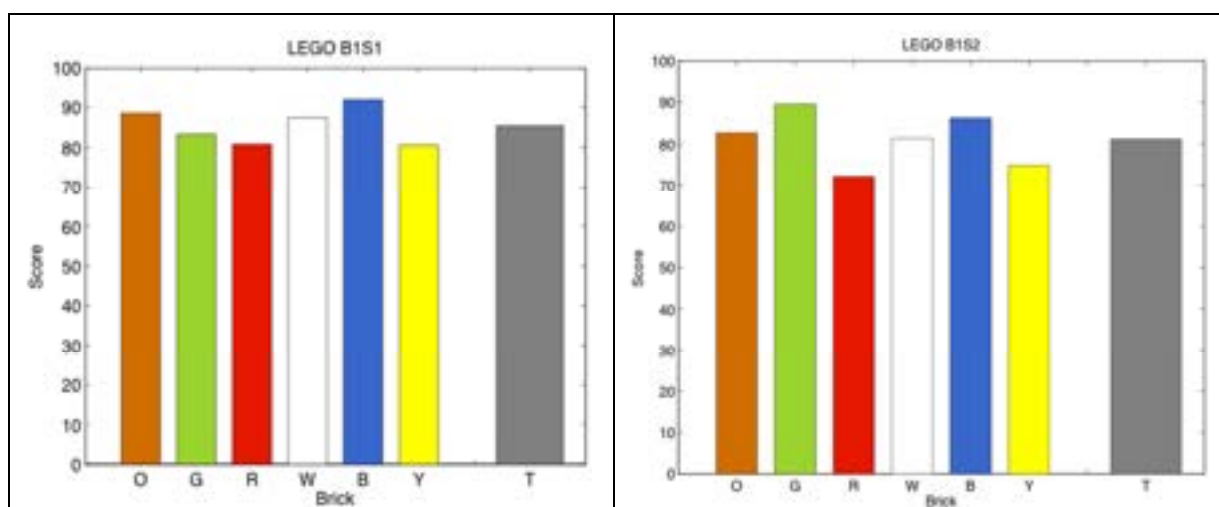
Sono stati considerati sei mattoncini colorati di: arancione, verde, rosso, bianco, blu e giallo (si veda figura 32).

In tabella 8 i risultati per le sei sorgenti di luce scelte. Totale 2 indica le medie considerando anche i dati non attendibili (considerando quindi 80 studenti).

Tabella 8: valutazioni medie da parte degli osservatori per i sei mattoncini colorati e medie totali, per le sei sorgenti di luce testate.

	Arancione	Verde	Rosso	Bianco	Blu	Giallo	Totale	Totale 2
B1S1	88.625	83.333	80.792	87.44	92	80.541	85.455	82.433
B2S1	82.75	74.166	73.521	83.208	80.125	74.854	78.104	71.308
B3S1	83.104	78.708	82.187	86.270	85.958	75.625	81.957	78.770
B1S2	82.666	89.583	72.083	81.375	86.250	74.791	81.125	79.433
B2S2	64.646	75.604	61	70.52	74.270	70.833	69.479	62.312
B3S2	88.646	90	91.75	92.021	91.979	89.979	90.729	90.177

In figura 43 gli stessi dati sono mostrati in forma grafica (dove O=orange/arancione, G=green/verde, R=red/rosso, W=white/bianco, B=blue/blu, Y=yellow/giallo, T= total/totale)



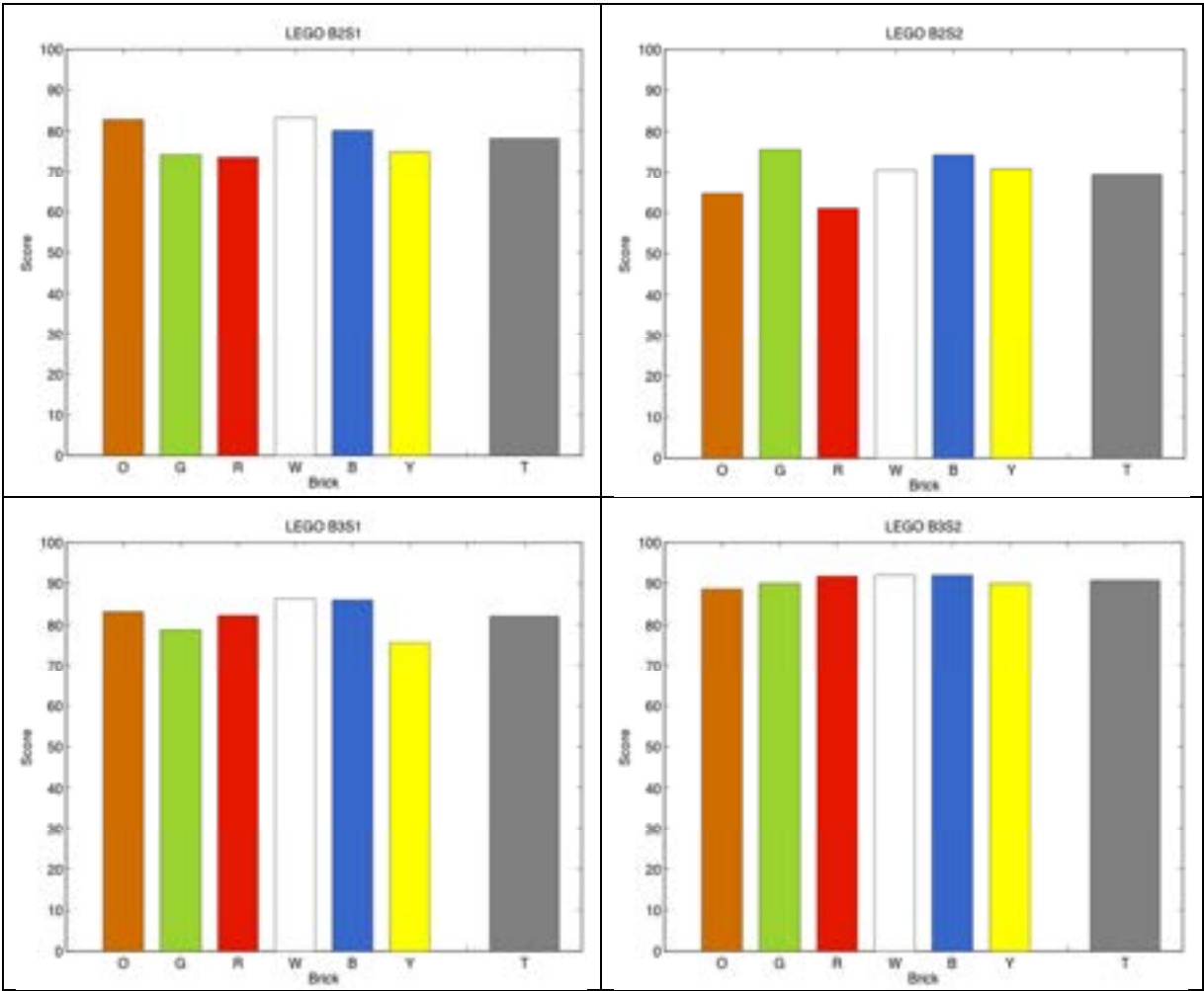


Figura 43: grafici delle medie riportati in tabella 7.

Anche in questo caso vengono riportato gli istogrammi nelle due forme (completi e approssimati alla decina, nelle figure 44-49) di tutti i dati.

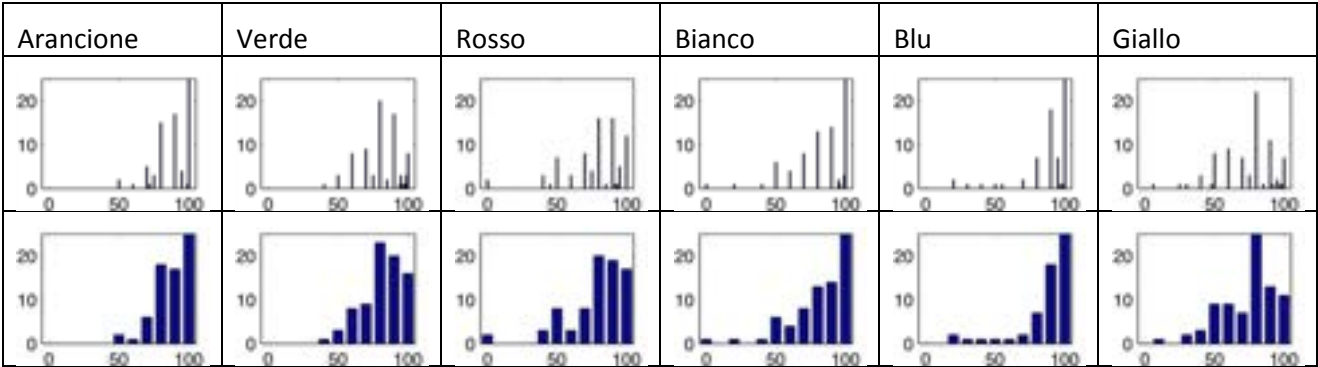


Figura 44: istogrammi relativi all'esperimento con i lego, osservati nella Box 1, illuminanti dalla sorgente 1 (B1S1).

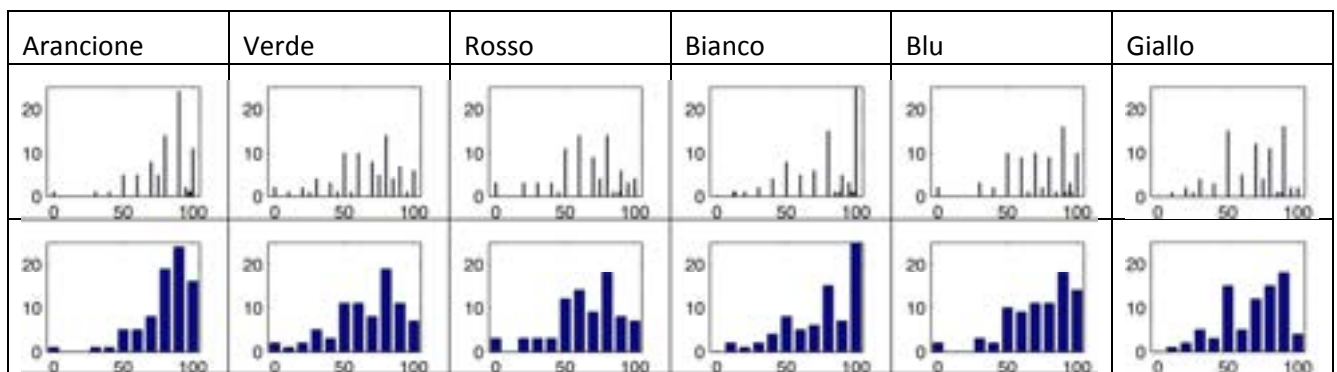


Figura 45: istogrammi relativi all'esperimento con i lego, osservati nella Box 2, illuminanti dalla sorgente 1 (B2S1).

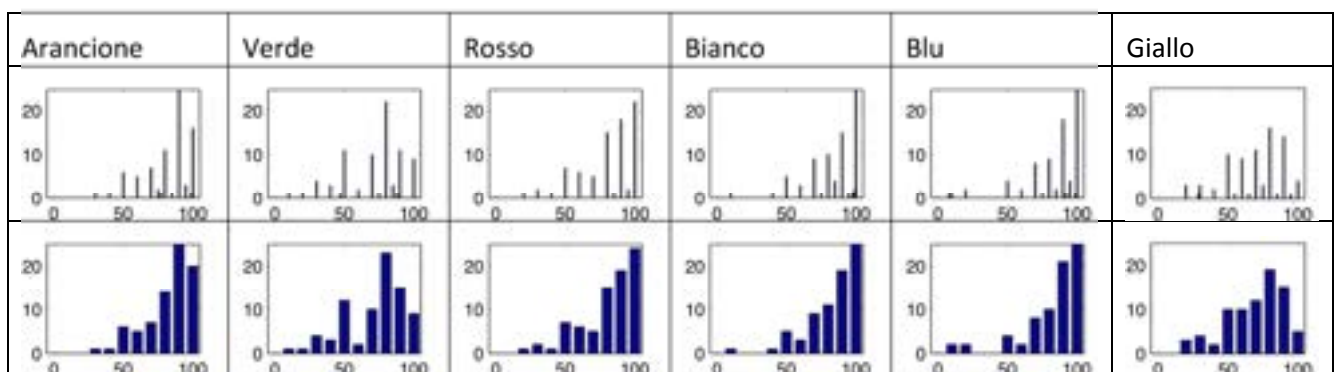


Figura 46: istogrammi relativi all'esperimento con i lego, osservati nella Box 3, illuminanti dalla sorgente 1 (B3S1).

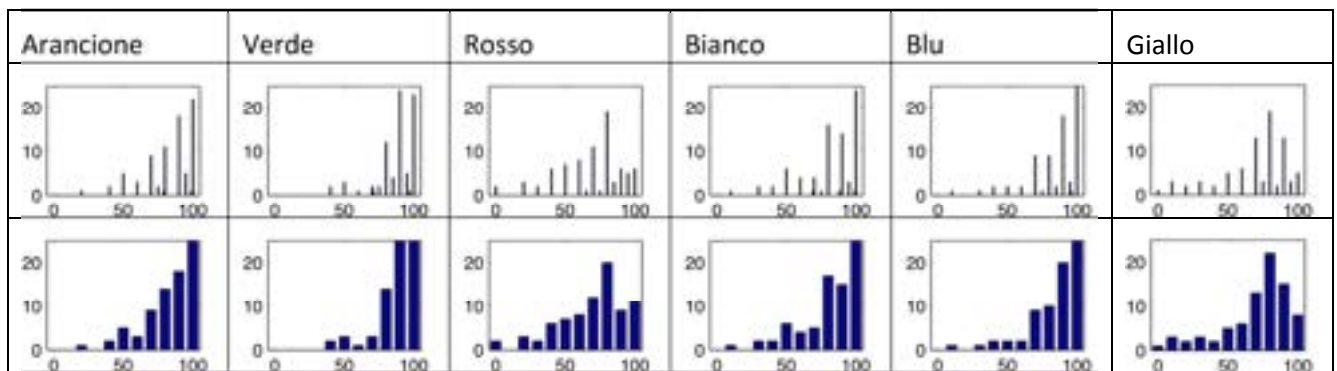


Figura 47: istogrammi relativi all'esperimento con i lego, osservati nella Box 1, illuminanti dalla sorgente 2 (B1S2).

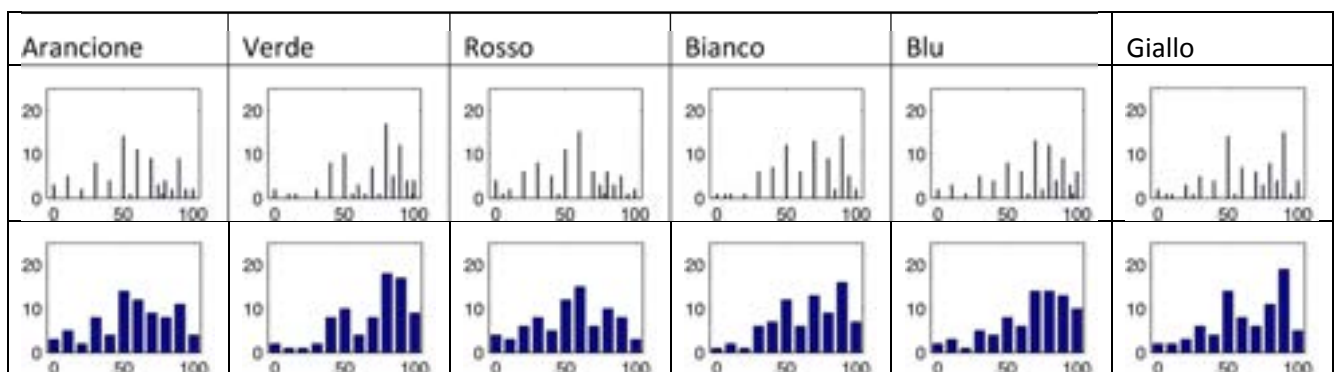


Figura 48: istogrammi relativi all'esperimento con i lego, osservati nella Box 2, illuminanti dalla sorgente 2 (B2S2).

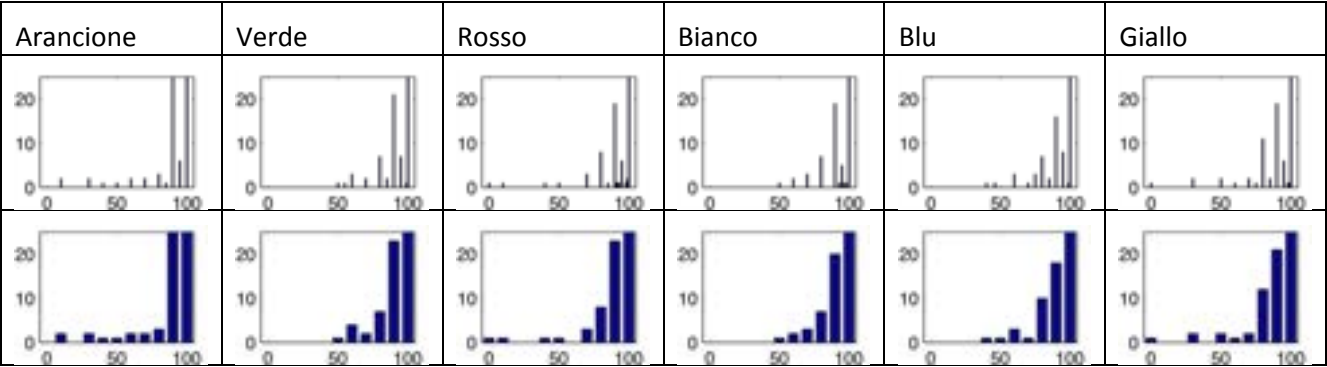


Figura 49: istogrammi relativi all'esperimento con i lego, osservati nella Box 3, illuminanti dalla sorgente 2 (B3S2).

Nel grafico di figura 50 vengono infine mostrate le medie dei punteggi di tutte le sorgenti di luce, utilizzando come i campioni le patch del Macbeth Color Checker (barre bianche) e i mattoncini LEGO™ (barre grigie).

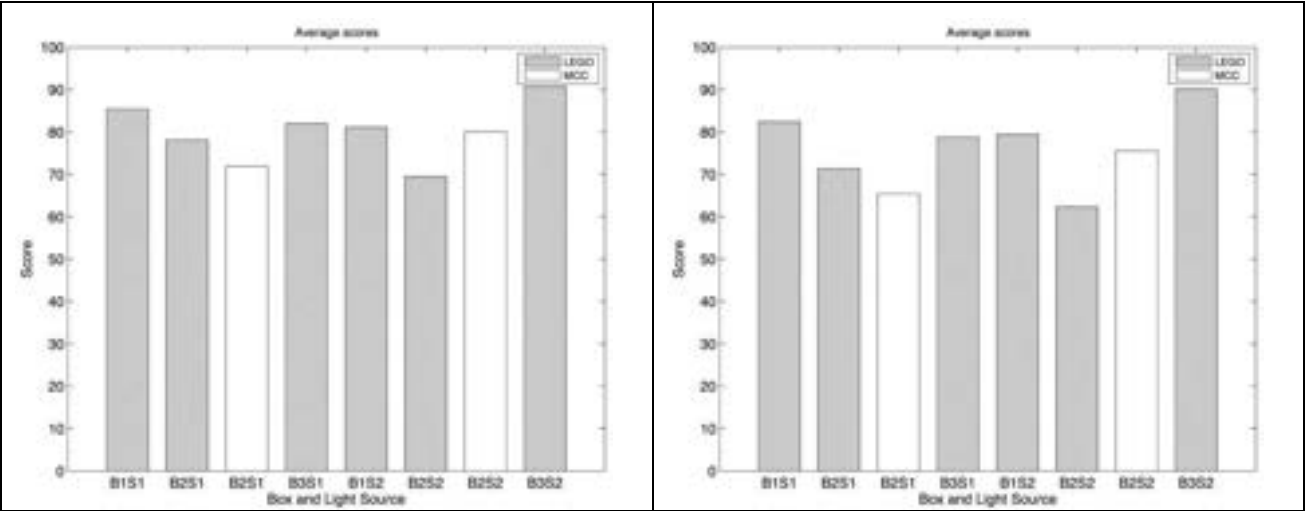


Figura 50: a sinistra le medie dei dati considerati attendibili, a destra le medie usando anche i dati considerati non attendibili.

Dai grafici in figura 50 si nota come tenendo conto o meno dei dati considerati non attendibili, l’andamento è quasi identico, se non leggermente scalato (principalmente perché sono stati tolti gli zeri che abbassano le medie).

Da questo grafico si deduce che la sorgente di luce che si comporta meglio è quella che si trova in B3S2 (Alogena, Philips Master Classic), mentre quella che da risultati peggiori è quella denominata B2S2 nel caso dei LEGO (Century Goccia MultiLED).

Notiamo come B2S1 e B2S2 diano risultati piuttosto differenti a seconda che si stia considerando una scena 3D (LEGO™) o 2D (Macbeth Color Checker), tuttavia, poiché non è possibile mettere in relazione l’uso di una scena 2D o 3D con la migliore percezione della resa visiva, poiché i due casi seguono due tendenze.

Conclusioni

Abbiamo voluto verificare nella pratica se e quanto l'indice di resa cromatica standard sia o meno adeguato a dare una stima della conservazione dell'apparenza cromatica. Gli esperimenti hanno confermato le riserve che il mondo scientifico nutre nei confronti di questo metodo di misura. Partendo dall'analisi delle caratteristiche del CRI standard abbiamo voluto approfondire, ed in molti casi testare, gli indici di resa cromatica alternativi che sono stati sviluppati in questi ultimi anni. Gli esperimenti condotti non avevano lo scopo di fare una classifica sulla bontà degli indici alternativi, ci interessava di più analizzare i loro principi base e le loro caratteristiche nel tentativo di disegnare un indice di resa cromatica più completo, che considerasse anche la distribuzione della luce nella scena, non solo le sue caratteristiche spettrali. Siamo infatti convinti che la configurazione della scena possa influenzare notevolmente l'apparenza cromatica. Abbiamo quindi investigato le misure del contrasto percettivo sviluppate finora e le abbiamo testate nel tentativo di poterle applicare in un CRI che tenga conto anche delle caratteristiche visive della scena da illuminare.

Una delle direzioni di ricerca da percorrere è senz'altro quella di includere negli indici di resa cromatica un modello di percezione visiva un po' meno semplificato di quelli usati oggi. Un esperimento preliminare in questo senso è stato presentato nel capitolo 3. I risultati sono ancora molto preliminari, ma riteniamo la direzione di ricerca molto promettente.

Le verifiche sperimentali dei capitoli 4 e 5 hanno avuto anche lo scopo di proporre un protocollo pratico per la verifica sul campo dell'indice di resa cromatica, non solo rispetto a riflettanze opache standard, ma anche ad oggetti tridimensionali con moderate interriflessioni ed a configurazioni metameriche.

I tre aspetti del progetto, indici alternativi di resa cromatica, misure di contrasto e test sul campo, si integrano nella necessità di futura ricerca e sperimentazione per lo sviluppo di indici di resa cromatica che tengano in considerazione anche il contesto di visione.

Alla fine del report abbiamo voluto aggiungere una bibliografia estesa per aiutare il lettore in un suo eventuale percorso di approfondimento.

Tale lavoro ha dato luogo, oltre a questo rapporto, ad una pubblicazione a conferenza internazionale già accettata:

Simonetta Fumagalli, Cristian Bonanomi, Alessandro Rizzi, "An experiment on the color rendering of different light sources", Color Imaging XVIII: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications, IS&T-SPIE Electronic Imaging, 3 - 7 February 2013, San Francisco (USA)

e ad altre pubblicazioni in preparazione che verranno inviate rispettivamente a:

- Journal of Optical Society of America A
- Conferenza CIE per il centenario "Towards a new century of light", 15-16 Aprile 2013, Parigi

Riferimenti bibliografici

1. CIE 17.4-1987 "International Lighting Vocabulary", ISBN 978 3 900734 07 7.
2. C. Oleari (a cura di), "Misurare il colore", Hoepli, 1998.
3. S. Brueckner, P. Bodrogi, T. Q. Khanh, "Colour Rendering of new white LED light sources – visual tests," Proceedings of Lux Europa, Istanbul, 2009, pp. 397-404.

4. R. W. G. Hunt, "Light and dark adaptation and the perception of color", *J. Opt. Soc. Am.* 42, 1952.
5. H. Helson, D.B. Judd, M.H. Warren, "Object color changes from daylight to incandescent filament illumination", *Illum. Eng.* 47, 1952.
6. D. L. MacAdam, "A nonlinear hypothesis for chromatic adaptation", *Vis. Res.* 1, 1961.
7. W. D. Wright, "Why and how chromatic adaptation has been studied," *Color Res. Appl.* 6, 1981.
8. L. Mori, H. Sobagaki, H. Komatsubara, K. Ikeda, "Field trials on CIE chromatic adaptation formula", *Proceedings of the CIE 22nd Session*, Melbourne, 1991.
9. M. D. Fairchild, "Formulation and testing of an incomplete-chromatic-adaptation model", *Color Res. Appl.* 16, 1991.
10. M. R. Luo, A. A. Clarke, P.A. Rhodes, A. Schappo, S. A. R. Scrivner, C.J. Tait, "Quantifying colour appearance. Part I". LUTCHI colour appearance data, *Color Res. Appl.* 16, 1991a.
11. M. R. Luo, A. A. Clarke, P.A. Rhodes, A. Schappo, S. A. R. Scrivner, C.J. Tait, "Quantifying colour appearance. Part II. Testing colour models performance using LUTCHI color appearance data, *Color Res. Appl.* 16, 1991b.
12. R. W. G. Hunt, M. R. Luo, "Evaluation of a model of colour vision by magnitude scalings: Discussion of collected results", *Color Res. Appl.* 19, 1994.
13. W. Davis, Y. Ohno, "Toward an improved color rendering metric," *Proceedings of SPIE 5941*, I.T. Ferguson, J.C. Carrano, T. Taguchi, and I.E. Ashdown, eds., San Diego: 2005.
14. W. Davis, Y. Ohno, "Development of a Color Quality Scale," *Proceedings of Light and Color in Lighting Research Office Symposium*, 2006.
15. CIE, Colour Rendering, TC 1-33 closing remarks, CIE Pubbl. No. 135/2, 1999.
16. D. Geisler-Moroder, A. Dur, "Color-rendering indices in global illumination methods," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 18, 2009, pp. 043015-12.
17. F. Szabó, I. Zilizi, P. Bodrogi, J. Schanda, "Visual experiments on colour harmony: a formula and a rendering index", CIE 2007 Session. Beijing, China, 2007.
18. K. Smet, W.R. Ryckaert, S. Forment, W. Hertog, G. Deconinck, P. Hanselaer, "Colour rendering: an object based approach," *CIE Light and Lighting Conference with special emphasis on LEDs and Solid State Lighting*, Budapest, Hungary: 2009.
19. K. Smet, S. Jost-Boissard, W. R. Ryckaert, G. Deconinck, P. Hanselaer, "Validation of a colour rendering index based on memory colours," in *CIE Lighting Quality & Energy Efficiency*, Vienna, 2010, pp. 136–142.
20. O. da Pos, M. L. Pietto, "Evaluation of light sources through the unique hues and a new multisensory semantic differential", *Atti della VII conferenza Nazionale del Colore*, Roma, 15-16 Settembre 2011.
21. H. Yaguchi, Y. Takahashi, S. Shioiri, "A proposal of color rendering index based on categorical color names". *Internat. Lighting Congress*, Istanbul 2001.
22. Li, C., Ronnier Luo, M., Li, C. and Cui, G. (2012), "The CRI-CAM02UCS colour rendering index", *Color Res. Appl.*, 37, pp. 160–167.
23. J. P. Freyssinier-Nova, M. S. Rea, "A two-metric proposal to specify the color-rendering properties of light sources for retail lighting, in *Tenth International Conference of Solid-State Lighting*, *Proceedings of SPIE* (San Diego, CA, 2010).
24. C. Oleari, "Colour Rendering Quality of a Light Source and Perceived Colour Gamut as the MacAdam Limit of the Adapted Observer CIE 31 by Perfect Colour-Constancy Actuation in a Colour-Vision Model

Based on the OSA-UCS System”, published in Atti della VII conferenza Nazionale del Colore, Roma, 15-16 Settembre 2011.

25. P. Bodrogi, S. Brückner, T.Q. Khanh, “Ordinal scale based description of colour rendering”, 2011, Color Res. Appl., 36, pp. 272–285.
26. P. Bodrogi, S. Brückner, T. Q. Khanh, “Re-defining the colour rendering index,” CIE Proceedings 2009.
27. <http://cie2.nist.gov/TC1-69/Darmstadt/cie-tc-1-69-darmstadt-rcr-method-equations-2a.pdf>, consultato a Luglio 2012.
28. L. A. Whitehead, M. A. Mossman, “A Monte Carlo method for assessing color rendering quality with possible application to color rendering standards”, 2012, Color Res. Appl., 37, pp.13–22.
29. K. Hashimoto, T. Yano, M. Shimizu, Y. Nayatani, “New method for specifying color-rendering properties of light sources based on feeling of contrast”, 2007, Color Res. Appl., 32, pp. 361–371.
30. CIE, “A method of predicting corresponding colours under different chromatic and illuminance adaptations”, CIE: Vienna, Austria; 1994. CIE Publication No. 109.
31. K. Hashimoto, Y. Nayatani, “Visual clarity and feeling of contrast”, 1994, Color Res Appl. 19, pp. 171–185.
32. A.A. Michelson, “Studies in Optics”, University of Chicago Press, Chicago (1927).
33. P.E. King-Smith, J.J. Kulikowski, “Pattern and flicker detection analyzed by subthreshold summation”, Journal of Physiology, 249, pp. 519-548, (1975).
34. D.A. Burkhardt, J. Gottesman, “Symmetry and constancy in the perception of negative and positive luminance contrast”, Journal of the Optical Society of America A, 1, pp. 309-316, (1984).
35. P. Whittle, “Increments and decrements: luminance discrimination”, Vision Res., 26, pp. 1677-1691, (1986).
36. E. Peli, Contrast in complex images, J. Opt. Soc. Am. A., Vol. 7, No. 10, pp. 2032-2040, (1990).
37. A. J. Ahumada, Jr., B. L. Beard., “A Simple Vision Model for Inhomogeneous Image Quality Assessment”, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA
38. Y. Tadmor, D.J. Tolhurst, Calculating the contrast that retinal ganglion cells and LGN neurones encounter in natural scenes, Vision Research 40, 3145-3157, (2000).
39. P. Reinagel, A. M. Zador, Natural scene statistics at the center of gaze, Network: Computation in Neural Systems, 10:1—10, (1999).
40. A. Rizzi, T. Algeri, G. Medeghini, D. Marini, “A proposal for Contrast Measure in Digital Images”, CGIV04, IS&T Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision, April 5-8, 2004, Aachen (Germany).
41. J.J. McCann, “Spatial Contrast and scatter: apposing partners in sensation”s, Electronic Imaging 1999, Conference on Human Vision and Electronic Imaging IV, pp. 97-104, San José, USA, 1999.
42. G. Simone, M. Pedersen, J. Y. Hardeberg, “Measuring perceptual contrast in digital images”. Journal of Visual Communication and Image Representation, 23 (2012), pp. 491-506
43. J. J. McCann, A. Rizzi “Art and Science of HDR Scene Imaging”, New York: John Wiley, 2011.
44. E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, P. Debevec, “High Dynamic Range Imaging”, Morgan Kaufmann, 2005.
45. A. Rizzi, J.J. McCann, “On the behavior of spatial models of color”, IS&T/SPIE Electronic Imaging 2007, S.José (California – USA), 28 gennaio – 1 febbraio 2007

46. E. Provenzi, M. Fierro, A. Rizzi, L. De Carli, D. Gadia, D. Marini, "Random Spray Retinex: a new Retinex implementation to investigate the local properties of the model", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 16, Issue 1, pp. 162-171, 2007.
47. E. Land and J. McCann, "Lightness and Retinex Theory", *J. Opt. Soc. Am.* 61(1), 1–11 (1971).

Bibliografia estesa

48. M. Abe, H. Ikeda, Y. Higaki, and M. Nakamichi, "A method to estimate correlated color temperatures of illuminants using a color video camera," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, 1991, pp. 28-33.
49. ASSIST, "Recommendations for Specifying Color Properties of Light Sources for Retail Merchandising," *Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies*, vol. 8, 2010.
50. K. Bieske, P. Csuti, and J. Schanda, "COLOUR APPEARANCE OF METAMERIC LIGHTS AND POSSIBLE COLORIMETRIC DESCRIPTION," *CIE Expert Symposium on Visual Appearance*, 2007, pp. 137-139.
51. N. Bo, P. Iacomussi, and G. Rossi, "On the LED Colour Rendering Evaluation for works of art lighting," *Proceedings of 11th Lux Europa*, Istanbul: 2009, pp. 405-410.
52. P. Bodrogi, S. Brückner, and T.Q. Khanh, "Effect of Inter-observer Variability of Colour Vision on the Colour Quality of Modern Light Sources," *Proceedings of Lux Europa*, Istnbul: 2009, pp. 393-396.
53. C. Chain, D. Dumortier, and M. Fontoynt, "A Comprehensive Model of Luminance, Correlated Colour Temperature and Spectral Distribution of Skylight: Comparison With Experimental Data," *Solar Energy*, vol. 65, Apr. 1999, pp. 285-295.
54. A.N. Chalmers, S. Soltic, Towards the Optimum Light Source Spectrum, *Advances in OptoElectronics* Volume 2010 (2010), Article ID 596825, 9 pages
55. C.-H. Chang, C.-C. Chen, C.-C. Wu, S.-Y. Chang, J.-Y. Hung, and Y. Chi, "High-color-rendering pure-white phosphorescent organic light-emitting devices employing only two complementary colors," *Organic Electronics*, vol. 11, Feb. 2010, pp. 266-272.
56. C.-H. Chang, K.-C. Tien, C.-C. Chen, M.-S. Lin, H.-C. Cheng, S.-H. Liu, C.-C. Wu, J.-Y. Hung, Y.-C. Chiu, and Y. Chi, "Efficient phosphorescent white OLEDs with high color rendering capability," *Organic Electronics*, vol. 11, Mar. 2010, pp. 412-418.
57. G. Cheng, M. Mazzeo, S. D'Agostino, F. Della Sala, S. Carallo, and G. Gigli, "Pure white hybrid light-emitting device with color rendering index higher than 90," *Optics letters*, vol. 35, Mar. 2010, pp. 616-8.
58. Commission Internationale de l'Éclairage. CIE Pub. 177. Colour Rendering of White LED Light Sources, Vienna, 2007 (Peter Bodrogi: TC chair)
59. C. Connolly and T. Fleiss, "A study of efficiency and accuracy in the transformation from RGB to CIELAB color space," *IEEE transactions on image processing*, vol. 6, Jan. 1997, pp. 1046-8.
60. T.L. Dawson, "Development of efficient and durable sources of white light," *Coloration Technology*, vol. 126, Feb. 2010, pp. 1-10.
61. M. de Kok, W. Sarfert, and R. Paetzold, "Tuning the colour of white polymer light emitting diodes," *Thin Solid Films*, vol. 518, Jul. 2010, pp. 5265-5271.
62. M. Dyble, N. Narendran, A. Bierman, and T. Klein, "Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods," in *Solid State Lighting*, vol. 5941 of *Proceedings of SPIE*, pp. 291–299, August 2005.

63. T. Erdem, S. Nizamoglu, X.W. Sun, and H.V. Demir, "A photometric investigation of ultra-efficient LEDs with high color rendering index and high luminous efficacy employing nanocrystal quantum dot luminophores," *Optics express*, vol. 18, Jan. 2010, pp. 340-7.
64. M.G. Figueiro, K. Appleman, J.D. Bullough, and M.S. Rea, "A discussion of recommended standards for lighting in the newborn intensive care unit," *Journal of Perinatology*, vol. 26, Oct. 2006, p. S19-S26.
65. S. A. Fotios, "The perception of light sources of different colour properties," PhD thesis, UMIST, Manchester, 1997.
66. M.K. Gunde, U.O. Krasovec, and W.J. Platzer, "Color rendering properties of interior lighting influenced by a switchable window," *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, vol. 22, Mar. 2005, pp. 416-23.
67. X. Guo and K. W. Houser, "A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources," *Light. Res. Technol.* **36**(3), 183–199 (2004).
68. G. He and L. Zheng, "White-light LED clusters with high color rendering," *Optics letters*, vol. 35, Sep. 2010, pp. 2955-7.
69. G. He and L. Zheng, "Color temperature tunable white-light light-emitting diode clusters with high color rendering index," *Applied optics*, vol. 49, Aug. 2010, pp. 4670-6.
70. K. Hirakawa and T.W. Parks, "CHROMATIC ADAPTATION AND WHITE-BALANCE PROBLEM," *IEEE International Conference on Image Processing, 2005. ICIP 2005*, IEEE, 2005, pp. III - 984-7.
71. C.-H. Hsiao, S.-W. Liu, C.-T. Chen, and J.-H. Lee, "Emitting layer thickness dependence of color stability in phosphorescent organic light-emitting devices," *Organic Electronics*, vol. 11, Sep. 2010, pp. 1500-1506.
72. K.N. Hui and K.S. Hui, "Vertically-stacked LEDs with invariance of color Chromaticity," *Current Applied Physics*, vol. 11, May. 2011, pp. 662-666.
73. S. J and M. G, "Colour rendering index of led light sources," *Proc. Lumen V4 Conf.*, Balatonfüred: 2006.
74. S. Jost-boissard, M. Fontoynt, and J. Blanc-gonnet, "COLOUR RENDERING OF LED SOURCES : VISUAL EXPERIMENT ON DIFFERENCE , FIDELITY AND PREFERENCE," *CIE Light and Lighting Conference with special emphasis on LEDs and Solid State Lighting*, Budapest, Hungary: 2009.
75. D.B. Judd, "A Flattery Index for Artificial Illuminants," *Illum. Eng. (N.Y.)* **62**, 593–598, 1962.
76. E.H. Kim, K.C. Kim, D.H. Kim, J.H. Baek, and T.G. Kim, "InGaN / GaN White Light-Emitting Diodes Thin Film Phosphor," *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*, vol. 46, 2010, pp. 1381-1387.
77. S.H. Kim, Y. Jin, J.Y. Yu, J. Kim, S. Song, H. Suh, and K. Lee, "Color stable white polymer light-emitting diodes with single emission layer," *Synthetic Metals*, vol. 160, Apr. 2010, pp. 835-838.
78. D.-hoon Lee, S. Park, S.-nam Park, J.-E. Lee, and Y.-wan Kim, "ARTIFACT PREPARATION FOR COMPARISON ON TOTAL LUMINOUS FLUX OF SSL PRODUCTS AMONG TESTING LABORATORIES IN KOREA," *Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency"*, 2010, pp. 839-841.
79. Z. Lei, G. Xia, L. Ting, G. Xiaoling, L. Qiaoming, and S. Guangdi, "Color rendering and luminous efficacy of trichromatic and tetrachromatic LED-based white LEDs," *Microelectronics Journal*, vol. 38, Jan. 2007, pp. 1-6.
80. K.C. Lin, "Approach for optimization of the color rendering index of light mixtures.," *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, vol. 27, Jul. 2010, pp. 1510-20.

81. J.M.M. Linhares, P.E.R. Felgueiras, P.D. Pinto, and S.M.C. Nascimento, "Colour rendering of indoor lighting with CIE illuminants and white LEDs for normal and colour deficient observers.," *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, vol. 30, Oct. 2010, pp. 618-25.
82. M.R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000," *Color Research & Application*, vol. 26, Oct. 2001, pp. 340-350.
83. M. López, M. Lindemann, N. Betzhold, M. Dämmig, and A. Sperling, "AGING OF PHOTOMETRIC AND COLORIMETRIC QUANTITIES OF HIGH-POWER LEDs," *CIE Proceedings Budapest*, Hungary: 2009.
84. W. Ma, Z. Shi, and R. Wang, "Luminescence properties of full-color single-phased phosphors for white LEDs," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 503, Jul. 2010, pp. 118-121.
85. J.M. Maciel Linhares, P.D. Araújo Pinto, and S.M. Cardoso Nascimento, "Color rendering of art paintings under CIE illuminants for normal and color deficient observers.," *Journal of the Optical Society of America. A*, vol. 26, Jul. 2009, pp. 1668-77.
86. E. Mahler, J.-J. Ezrati, F. Viénot, Testing LED Lighting for Colour Discrimination and Colour Rendering, *Color Research and Application* 34 (2009) 8-17.
87. R. McCluney, "Color-rendering of daylight from water-filled light pipes," *Solar Energy Materials*, vol. 21, Dec. 1990, pp. 191-206.
88. N. Narendran, "Requirements for Solid-state Lighting," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* ., 2004, pp. 7120-7120.
89. N. Narendran and L. Deng, "Color rendering properties of LED light sources," *Solid State Lighting II : Proceedings of SPIE*, SPIE, 2002, pp. 61-67.
90. D. Nickerson, "Light Sources and Color Rendering," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 50, Jan. 1960, pp. 57 - 69.
91. Y. Ohno, "Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra," *Fourth International Conference on Solid State Lighting. Proc. of SPIE Vol 5530*, I.T. Ferguson, N. Narendran, S.P. Denbaars, and J.C. Carrano, eds., SPIE, 2004, pp. 88-98.
92. Y. Ohno, "CIE Fundamentals for Color Measurements," *IS&T NIP16 Intl. Conf. on Digital Printing Technologies*, Vancouver, Canada: 2000, pp. 540 - 545.
93. N. Ohta and G. Wyszecki, "Designing illuminants that render given objects in prescribed colors," *Journal of Optical Society of America*, vol. 66, 1976, pp. 269-275.
94. G. Paschos, "Perceptually uniform color spaces for color texture analysis: an empirical evaluation," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, Jun. 2001, pp. 932-937.
95. A. Pawlak and K. Zaremba, "LED Luminaire with Adjustable Colour Temperature," *Proceedings of Lux Europa*, Istanbul: 2009, pp. 215-220.
96. E. Perales, F. Martínez-verdú, and V. Viqueira, "New contributions for the revision of colour rendering for light sources based on the colour gamut volume," *En: Ciencia y tecnología del color : Seminario de la Red Temática, celebrado en Granada los días 18 y 19 de abril de 2007*, Madrid: Red Temática "Ciencia y Tecnología del Color", 2007, pp. 1-4.
97. M. R. Pointer, "Measuring colour rendering—a new approach," *Light. Res. Technol.* **18**(4), 175–184, 1986.
98. M. Rea, J. P. Freyssinier, Color rendering: Beyond pride and prejudice. *Color Research and Application*, 35 (2010) 401–409.

99. AR. Robertson, "Computation of Correlated Color Temperature and Distribution Temperature," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 58, 1968, pp. 1528-1535.
100. N. Sándor, P. Bodrogi, P. Csuti, B. Kránicz, J. Schanda, "Direct visual assessment of colour rendering, In: Proceedings of the 25th session of the CIE", San Diego, 2003, Vol.1, Part 1. D1, pp. 188-191.
101. N. Sándor and J. Schanda, "Visual Colour-rendering experiments," *AIC Colour 05 - 10th Congress of the International Colour Association*, Granada: 2005, pp. 511-514.
102. N. Sandor and J. Schanda, "Visual colour rendering based on colour difference evaluations," *Lighting Research and Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 225-239, 2006.
103. R. Saraiji, "STREETLIGHTING UNIT POWER DENSITY," *Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency"*, Vienna, Austria: 2010, pp. 830-838.
104. J. Schanda, "CIE Standards for assessing quality of light sources," 1998, pp. 1-11.
105. J.D. Schanda, "Implications of vision research on luminescence investigation," *Journal of Luminescence*, vol. 24-25, 1981, pp. 851-860.
106. J. Schanda and N. Sandor, "Colour Rendering , Past – Present – Future," *International Lighting and Colour Conf.*, Cape Town: 2003, pp. 1-9.
107. J. Schanda, "COLOUR RENDERING OF LIGHT SOURCES," *Colorimetry: Understanding the CIE System*, J. Schanda, ed., Wiley, 2007, pp. 207-215.
108. J. Schanda, "CIE RECOMMENDATIONS AND STANDARDS ON COLORIMETRY , WHAT NEXT ?," *CIE Symposium - 75 years of CIE Colorimetry*, Ottawa: 2006.
109. B.N. Schenkman and L.T. Kjellhahl, "Preferred colour temperature on a colour screen," *Displays*, vol. 20, Aug. 1999, pp. 73-81.
110. K. Schulmeister, "REVISIONS OF THE INTERNATIONAL SAFETY LIMITS FOR OPTICAL RADIATION," *Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency"*, Vienna, Austria: 2010, pp. 842-844.
111. T. Seim, "In search of an improved method for assessing the colour rendering properties of light sources," *Light. Res. Technol.* **17**□1□, 12-22, 1985.
112. C. Shen, Y. Yang, S. Jin, J. Ming, H. Feng, and Z. Xu, "White light-emitting diodes using blue and yellow–orange-emitting phosphors," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 121, Sep. 2010, pp. 1487-1491.
113. K. Smet, W.R. Ryckaert, S. Forment, W. Hertog, G. Deconinck, and P. Hanselaer, "COLOUR RENDERING : AN OBJECT BASED APPROACH," *CIE Light and Lighting Conference with special emphasis on LEDs and Solid State Lighting*, Budapest, Hungary: 2010.
114. K. Smet, "A colour rendering metric based on memory colours (MCRI)," *Journal of the American Statistical Association*, pp. 438-440.
115. K. Smet, W.R. Ryckaert, M.R. Pointer, G. Deconinck, and P. Hanselaer, "Memory colours and colour quality evaluation of conventional and solid-state lamps," *Color Research & Application*, vol. 18, Jun. 2010.
116. J. Smith, "Calculating Color Temperature and Illuminance using TAOS TCS3414CS Digital Color Sensor," *TAOS*, 2009, pp. 1-7.
117. S. Soltic, A.N. Chalmers, "Influence of Peak Wavelengths on Properties of Mixed-LED White-Light Sources", *Advances in OptoElectronics*, Volume 2010 (2010), Article ID 437564, 8 pages
118. Z. Sun, Q. Zhang, Y. Li, and H. Wang, "Thermal stable La₂Ti₂O₇:Eu³⁺ phosphors for blue-chip white LEDs with high color rendering index," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 506, Sep. 2010, pp. 338-342.

119. F. Szabo, J. Schanda, P. Bodrogi, and E. Radkov, "A COMPARATIVE STUDY OF NEW SOLID STATE LIGHT SOURCES," *CIE 26th Session, CIE 178:2007 D1-18 - D1-21*, 2007, pp. 1-4.
120. F. Szabó, "New Metric on Light Source Colour Quality : Colour Harmony Rendering Index," Norway: , pp. 52 - 56.
121. T. Taguchi, Developing White LED Lighting Systems and Its Technological Roadmap in Japan, *Journal of Light & Visual Environment* 30 (2006) 177–182.
122. W. Thornton, "Color-Discrimination Index," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 62, Feb. 1972, p. 191.
123. W. A. Thornton, "A validation of the color-preference index," *J. Illum. Eng. Soc.* **4**, 48–52, 1974.
124. J.A. Veitch, G.R. Newsham, C.C. Jones, C.D. Arsenault, and S. Mancini, "HIGH-QUALITY LIGHTING : ENERGY-EFFICIENCY THAT ENHANCES EMPLOYEE WELL-BEING," *Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency"*, Vienna, Austria: 2010, pp. 197-204.
125. F. Viénot, E. Mahler, J.-J. Ezrati, C. Boust, A. Rambaud, A. Bricoune. Color Appearance under LED illumination: the visual judgement of observers, *Journal of Light and Visual Environment*, 32 (2008) 208-213
126. F. Viénot, M.-L. Durand, E. Mahler, Kruithof's rule revisited using LED illumination, *Journal of Modern Optics* 56 (2009) 1433-1446.
127. W. Xiaxia and X. Dehong, "A New Chromatic Adaptation Model for Different Illuminations," *International Conference on Computer Science and Software Engineering*, IEEE, 2008, pp. 38-41.
128. H. Xu, "Colour rendering capacity and luminous efficiency of a spectrum," *Light. Res. Technol.* **25**(3), 131–132, 1993.
129. H. Xu, "Sample-independent color rendering index," *Color Res. Appl.* **20**(4), 251–254, 1995.
130. H. Yang, Y. Shi, Y. Zhao, Y. Meng, W. Hu, J. Hou, and S. Liu, "High colour rendering index white organic light-emitting devices with three emitting layers," *Displays*, vol. 29, Oct. 2008, pp. 327-332.
131. S. Ye, F. Xiao, Y.X. Pan, Y.Y. Ma, and Q.Y. Zhang, "Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 71, Aug. 2010, pp. 1-34.
132. X. Zhang, N. Choi, K. Park, and J. Kim, "Orange emissive Sr₃Al₂O₅Cl₂:Eu²⁺ phosphor for warm-white light-emitting diodes," *Solid State Communications*, vol. 149, Jul. 2009, pp. 1017-1020.
133. A.Zukauskas, R. Vaicekauskas, F. Ivanauskas, H. Vaitkevicius, P. Vitta, and M.S. Shur, "Statistical Approach to Color Quality of Solid-State Lamps," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, 2009, pp. 1189-1198

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca fa capo a due laboratori del Dipartimento di Informatica dell'Università degli Studi di Milano, l'HTL (Human Technology Lab) ed il laboratorio di Eidomatica. Entrambi i laboratori, con taglio diverso ma complementare si occupano di colore, percezione ed immagini digitali. Ai laboratori afferiscono due professori associati (Alessandro Rizzi e Daniele Marini), un ricercatore (Davide Gadia), due collaboratori di ricerca (Cristian Bonanomi e Gianfranco Garipoli) ed un dottorando (Enrico Calore).

Alessandro Rizzi è professore associato al Dipartimento di Informatica all'Università degli Studi di Milano. Insegna fondamenti di immagini digitali, video multimedia, interazione uomo-macchina. Ricerca nel campo dell'imaging digitale e visione fin dal 1990. È particolarmente interessato agli argomenti legati alla percezione. È uno dei fondatori del gruppo italiano Gruppo del Colore. È autore di più di 200 articoli scientifici e ha recentemente pubblicato un libro scritto assieme a John McCann dal titolo "The Art and Science of HDR Imaging".

Cristian Bonanomi è collaboratore di ricerca al dipartimento di Informatica dell'Università degli Studi di Milano. Ha ricevuto il suo diploma di dottorato in Informatica nel 2011. È autore di vari articoli riguardanti l'apparenza del colore, elaborazione di immagini, percezione di ambienti tridimensionali e sistemi di illuminazione.