

## Resumen

Un dispositivo de captura (escáner o cámara) de imágenes digitales no es un instrumento de medida del color como un espectrofotómetro o un tele-espectrocolorímetro. Aunque codifica la información espectral contenida en una escena en tres canales de color RGB, los datos digitales RGB asociados a un estímulo visual no son los mismos que codificaría el observador humano, el cual se caracteriza por el observador patrón colorimétrico CIE-1931 XYZ. Este trabajo desarrolla un algoritmo general de caracterización colorimétrica para cualquier dispositivo de captura incorporando un estudio del grado de exactitud (errores sistemáticos) y precisión (errores aleatorios) con respecto un tele-espectrocolorímetro.

El modelo de caracterización se divide en un algoritmo de caracterización espectral y otro de caracterización colorimétrica. El dispositivo de captura usado ha sido una cámara CCD-RGB Sony DXC-930P conectada a una tarjeta digitalizadora Matrox MVP-AT 850.

La caracterización espectral consiste en la determinación de las funciones de igualación, las cuales son básicamente las curvas de sensibilidad espectral relativa más dos factores de escalado: el escalado conjunto entre ellas y el balance de blanco ideal. El punto de partida para obtenerlas es la determinación de las funciones espectrales de conversión optoelectrónica (OECSF), que no son más que una relación empírica entre los niveles digitales RGB y la exposición espectral incidente en el sensor optoelectrónico. Gracias a ellas, hemos comprobado que la ley de la reciprocidad –la respuesta del sistema es independiente frente a valores idénticos de exposición espectral, pero obtenidos variando la apertura relativa  $N$  o el tiempo de exposición  $t$ – se verifica en Fotografía Digital, cuando no se verifica en Fotografía Fotoquímica. Utilizando dos términos ambivalentes de sensibilidad espectral –responsividad y espectro de acción– hemos determinado también las sensibilidades espectrales completas de los canales-color RGB, las cuales se han utilizado para describir el comportamiento de transferencia fotónica (función espectral de ganancia incremental, eficiencia cuántica, etc), un modelo de codificación cromática y las funciones de igualación.

La caracterización colorimétrica consiste en la transformación de los datos digitales RGB en valores triestímulo absolutos CIE-XYZ (en  $\text{cd}/\text{m}^2$ ) frente a condiciones espectralradiométricas variables y desconocidas a priori. Así, en primer lugar, se ha aplicado un balance de grises sobre los datos digitales RGB para convertirlos en valores colorimétricos relativos RGB. En segundo lugar, se ha incluido por primera vez un algoritmo de adaptación luminosa con el que podemos variar controladamente la apertura relativa  $N$  del objetivo fotográfico sin por ello variar la especificación triestímulo absoluta CIE-XYZ que estimamos a partir del perfil colorimétrico entre RGB y XYZ. Con estos dos pasos previos, se ha analizado el nivel de reproducción del color de nuestro dispositivo de captura con respecto un tele-espectrocolorímetro, tanto en su estado bruto como una vez compensado con un modelo lineal de corrección de color. Se ha evaluado el grado de exactitud utilizando el espacio psicométrico CIE- $L^*a^*b^*$  y el algoritmo de índice de reproducción del color tras implementar previamente el modelo de apariencia de colores aislados Hunt'91. También se ha analizado la propagación de los errores aleatorios desde los niveles digitales RGB hasta CIE-XYZ y CIE- $L^*a^*b^*$ . Por último, se ha obtenido la gama de colores reproducibles del dispositivo a partir de la determinación del triángulo de primarios fundamentales y la

captura simulada de los colores óptimos y varias muestras del Atlas Munsell. Los resultados obtenidos indican que, en general, debido a las limitaciones optoelectrónicas del rango dinámico espectralradiométrico de entrada, nuestro dispositivo de captura, en estado bruto, aclara y desatura los colores, con lo cual los errores colorimétricos serán más notables cuando se pretenda captar colores oscuros con una apertura relativa  $N$  fija.

## Resum

Un dispositiu de captació (escàner o càmera) d'imatges digitals no és un instrument de mesura del color com un espectrefotòmetre o un tele-espectrecolorímetre. Encara que codifica la informació espectral inclosa en una escena en tres canals de color RGB, les dades digitals RGB associades a un estímul visual no són les mateixes que codificaria l'observador humà, el qual es caracteritza per l'observador patró colorimètric CIE-1931 XYZ. Aquest treball desenvolupa un algorisme general de caracterització colorimètrica per a qualsevol dispositiu de captació afegint-ne un estudi del grau d'exactitud (errors sistemàtics) i precisió (errors aleatoris) respecte un tele-espectrecolorímetre.

El model de caracterització es divideix en un algorisme de caracterització espectral i un altre de caracterització colorimètrica. El dispositiu de captació emprat ha sigut una càmera CCD-RGB Sony DXC-930P connectada amb una tarja digitalitzadora Matrox MVP-AT 850.

La caracterització espectral consisteix en la determinació de les funcions d'igualació, els quals són bàsicament les corbes de sensibilitat espectral relativa a més de dos factors d'escalat: l'escalat conjunt entre elles i el balanç de blanc ideal. El punt de sortida per a obtenir-les és la determinació de les funcions espectrals de conversió optoelectrònica (OECSF), que no són més que una relació empírica entre els nivells digitals RGB i l'exposició espectral incident sobre el sensor optoelectrònic. Gràcies a elles, hem comprovat que la llei de la reciprocitat –la resposta del sistema és independent en front a valors idèntics d'exposició espectral, però obtinguts variant l'obertura relativa  $N$  o el temps d'exposició  $t$ – es verifica en Fotografia Digital, quan no es verifica en Fotografia Fotoquímica. Emprant dos conceptes ambivalents de sensibilitat espectral –responsivitat i espectre d'acció– hem determinat també les sensibilitats espectrals complertes dels canals RGB, els quals s'han utilitzat per a descriure el comportament de transferència fòtonica (funció espectral de ganància incremental, eficiència quàntica, etc) i un model de codificació cromàtica, i per a calcular les funcions d'igualació.

La caracterització colorimètrica consisteix en la transformació de les dades digitals RGB en valors triestímuls absoluts CIE-XYZ (en  $\text{cd/m}^2$ ) en front a condicions espectreradiomètriques variables i desconegudes a priori. Així, en primer lloc, s'ha aplicat un balanç de grisos sobre les dades digitals RGB per a convertir-les en valors colorimètrics relatius RGB. En segon lloc, s'ha afegit per primera vegada un algorisme d'adaptació luminosa amb el que podem variar controladament l'obertura relativa  $N$  de l'objectiu fotogràfic sense per això variar l'especificació triestímul absoluta CIE-XYZ que estimem a partir del perfil colorimètric entre RGB i XYZ. Amb aquests dos passos previs, hem analitzat respecte un tele-espectrecolorímetre el nivell de reproducció del color del nostre dispositiu de captació, tant en el seu estat brut de funcionament com una vegada compensat amb un model lineal de correcció de color. Hem avaluat el grau d'exactitud utilitzant l'espai psicomètric CIE-L\*a\*b\* i l'algorisme d'índex de reproducció del color després d'implementar el model de aparença de colors aïllats Hunt'91. Hem analitzat també la propagació d'errors aleatoris des dels nivells digitals RGB fins a CIE-XYZ i CIE-L\*a\*b\*. Per últim, hem determinat a més el conjunt o gamma de colors reproduïbles del dispositiu a partir de l'obtenció del triangle de primaris fonamentals i la captació simulada dels colors òptims i vàries mostres de l'Atlas Munsell. Els resultats obtinguts indiquen que, en general, degut a les limitacions optoelectròniques del

rang dinàmic espectreradiomètric d'entrada, el nostre dispositiu de captació, en el seu estat brut de funcionament, claretja i desatura el colors, amb lo qual els errors colorimètrics destaquen més quan van associats a la captació de colors foscos amb una obertura relativa  $N$  fixa.

## Abstract

A digital image capture device (scanner or camera) is not a tool for measuring colour as a spectrophotometer or a tele-spectroradiometer. Although it encodes the spectral information enclosed in a scene into three RGB colour channels, the RGB digital data associated to a visual stimulus are not the same that would encode a human observer, who is characterised by the CIE-1931 XYZ standard observer. This work shows a general algorithm of colorimetric characterisation for any digital image capture device incorporating a study of the accuracy (systematic errors) and precision (statistical errors) levels with respect to a tele-spectroradiometer.

The characterisation model is divided into two algorithms of spectral and colorimetric characterisation. The digital image capture device is a CCD-RGB camera Sony DXC-930P connected to a frame grabber Matrox MVP-AT 850.

The spectral characterisation consists of the calculation of the colour-matching functions, which are basically the curves of relative spectral sensitivity modified by two scaling factors: the joint scaling factor between them and the ideal white balance. The first step to obtain them is the measurement of the optoelectronic conversion spectral functions (OECSF), which are just an empirical relationship between the RGB digital levels and the spectral exposure incident on the optoelectronic sensor. Thanks to these functions, we have proved that the reciprocity law –identical values of spectral exposure yield identical responses even if the relative aperture  $N$  or the exposure time  $t$  change– is verified in Digital Photography, although it is not verified in Photochemical Photography. Using two equivalent concepts of spectral sensitivity –responsivity and action spectrum– we have also determined the complete spectral sensitivities of the RGB colour-channels, which are used to describe the optoelectronic performance (incremental gain spectral function, quantum efficiency, etc), a chromatic encoding model, and the colour-matching functions.

The colorimetric characterisation consists of transforming the RGB digital data into absolute tristimulus values CIE-XYZ (in  $\text{cd/m}^2$ ) under variable and unknown spectroradiometric conditions. So, at the first stage, a grey balance has been applied over the RGB digital data to convert them into RGB relative colorimetric values. At a second stage, an algorithm of luminance adaptation has been included for the first time. With this algorithm, we can change suitably the relative aperture  $N$  of the zoom lens without changing the absolute tristimulus specification CIE-XYZ estimated from the colorimetric profile between RGB and XYZ colour spaces. With these previous steps, the colour reproduction level of our digital image capture device has been compared with that obtained with a tele-spectroradiometer, both in a raw state and with the corrections from a linear model of colour correction. The accuracy level has been evaluated using the colour space CIE-L\*a\*b\*. The algorithm of colour reproduction index has been evaluated implementing previously the unrelated Hunt'91 colour appearance model. The propagation of the statistical errors from the RGB digital data to CIE-XYZ and CIE-L\*a\*b\* values has been also studied. Finally, the device gamut has been obtained from the determination of the additive triangle of fundamental primaries and the simulated capture of the optimal colours and some Munsell chips. The obtained results indicate that, in general, due to the optoelectronic limitations of the spectroradiometric

dynamic range, our digital image capture device, in raw performance, lightens and desaturates the colours, so dark colours captured with a fixed relative aperture  $N$  will have high colorimetric errors.