

Implementación del modelo Retinex aplicado al procesamiento de imágenes subacuáticas para mejorar su contenido cromático

Mario Dehesa, Alberto J. Rosales, Francisco J. Gallegos, Samuel Souverville,
Isabel V. Hernández

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco,
México DF, México

m_dehesa@hotmail.com, arosales@ipn.mx

Resumen. Una de las principales dificultades para una correcta captura de imágenes subacuáticas utilizando medios electrónicos (cámara fotográfica o de video), se presenta en el mismo ambiente subacuático en donde la iluminación y el tono de la fuente de luz cambian dependiendo de la profundidad del escenario para la captura de la imagen, esto debido a las diferentes longitudes de onda que se logran filtrar a diferentes niveles de profundidad, lo que trae como consecuencia la captura de diferentes tonos con condiciones de iluminación no uniformes, debido a la dispersión de la luz incidente y a las diferentes longitudes de onda capturadas por el sensor del dispositivo de adquisición, lo que provoca que los colores sean modificados. Como solución, se propone el uso del modelo Retinex, este modelo se basa en el entendimiento del Sistema Visual Humano (SVH-HVS) y hace uso del fenómeno de constancia del color, esto para disminuir el efecto producido mediante los problemas identificados anteriormente. Éste modelo se utilizará como una etapa de pre-procesamiento para que de esta manera se manipule la escena capturada, los resultados se verán mediante la modificación del contenido cromático de la imagen, principalmente en las áreas con poca iluminación. Finalmente, en este artículo se evaluarán los resultados experimentales de dos modelos aplicados a imágenes subacuáticas, Retinex simple y Retinex multiescala.

Palabras clave: cromaticidad, brillantez, fuente de iluminación, sistema de Visión, modelos Retinex.

1. Introducción

Un problema que se observa en los medios electrónicos para la captura de imágenes es que son muy sensibles a las diferentes fuentes de luz y los fenómenos naturales como pueden ser lluvia, niebla, contaminación, etc. Las imágenes capturadas con cámaras fotográficas y de video en presencia de estos fenómenos muestran dificultades en el reconocimiento de regiones y áreas de interés para determinadas aplicaciones, este tipo

de fenómenos produce una captura deficiente de la información, además de la presencia inherente del ruido propio añadido por el sistema de captura.

El modelo del Sistema de Visión Humano (HVS) tiene como característica propia la posibilidad de tener tanto las componentes de cromaticidad de los objetos, y de manera separada, la longitud de onda de la fuente de iluminación (componentes de luminosidad y de cromaticidad). Estas componentes podrán ser procesadas de manera independiente sin afectar las características en las cuales no se requiere manipular la información de luminosidad y de cromaticidad al mismo tiempo; por ejemplo, si en la noche se ilumina un espacio con un foco de filamento de tungsteno, éste nos dará una luz amarilla, pero alrededor del espacio de iluminación, los colores mantendrán su respectivo balance de color. Esta investigación tiene importantes aplicaciones prácticas, una de las principales es la que encontramos para la reproducción de imágenes fotográficas y de video. Además el modelo de constancia del color tiene aplicaciones en el campo de la radiografía médica, la fotografía submarina y la fotografía forense, entre otras [1], este fenómeno fue demostrado por primera vez por el Dr. Edwin H. Land. El Dr. Land demostró como el HVS es capaz de detectar la cantidad de energía que impacta a un objeto desde una fuente luminosa desconocida; esto produjo el desarrollo de la teoría de la “Constancia del Color” [2].

2. Imágenes y modelos

En este artículo se presenta el modelo Retinex aplicado al tratamiento de imágenes subacuáticas que se obtuvieron de la página de la NASA - Langley Research Center, y se usaron en el proyecto “Retinex Image Processing” [3].

El modelo Retinex propuesto por el Dr. Edwin Land, tiene la característica de utilizar operadores matemáticos, que asemejan el fenómeno de constancia del color presente en el HVS. La constancia del color (Sección 2.1) es una característica deseable en el pre-procesado de imágenes digitales. Para cumplir este propósito existen en la actualidad diferentes investigaciones que se han dedicado al mejoramiento del modelo Retinex propuesto por el Dr. Land [4].

Estos modelos reciben como entrada en cada pixel los valores del color rojo, verde, y azul, en donde el algoritmo Retinex es el encargado de realizar la estimación de la reflectancia en cada pixel [5], con el objetivo de poder estimar el valor de la fuente de iluminación, como se muestra en la ecuación (1).

$$f_i(x, y) = G(x, y)R_i(x, y)I_i, \quad (1)$$

donde I_i es la fuente de iluminación estimada en la escena como se muestra en la sección 2.2, $f_i(x, y)$ es la intensidad de cada pixel de una imagen en la posición (x, y) , $G(x, y)$ es un factor que depende de las características de la escena, $R_i(x, y)$ es la reflectancia de un punto del objeto en la misma posición. El sub-índice i corresponde al canal de color en la imagen ($i = \{\text{Rojo } (R), \text{ Verde } (G), \text{ Azul } (B)\}$).

2.1. Constancia del color

El modelo Retinex se basa principalmente en como el HVS comprende el color, el cual percibe de una escena el producto de la reflectancia y la distribución espectral de la iluminación, como se mostró en la ecuación (1) [2]. Desde el punto de vista fotométrico, un objeto de color rojo que es iluminado con una fuente luminosa en color verde, deberá producir la misma distribución espectral que un objeto de color verde iluminado con una fuente luminosa de color rojo [6]. Pero aún bajo estas condiciones, el color del objeto permanece estable independientemente de los cambios en la longitud de onda de la fuente luminosa, y esto se debe gracias a una teoría conocida como “Constancia del Color” [6].

La constancia del color se apoya en el campo de la radiometría en donde se describe como los receptores presentes en la retina miden la energía total captada en cada uno de los sensores presentes en la retina, esto se puede calcular integrando todas las longitudes de onda (λ), considerando tres tipos de conos sensibles en la banda del espectro magnético visible en el color rojo, verde y azul. En donde $S_i(\lambda)$ responde a una curva de tres receptores, el subíndice i representa cada uno de los canales de color ($i \in \{R, G, B\}$). Siendo $E(\lambda)$ la irradiancia, es decir, la potencia incidente sobre los receptores por unidad de superficie por determinada longitud de onda (λ). Entonces la energía medida (Q_i) por un solo receptor se calcular como en la ecuación (2)

$$Q_i = \int S_i(\lambda)E(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

El fenómeno de Constancia del Color es el encargado de separar la reflectancia de la iluminación de la escena [7], con lo cual se podrá definir la característica espectral de la fuente de luz, con esto se podrá calcular un valor aproximado de la reflectancia, como se muestra en la ecuación (3). En donde la irradiancia de la luz que es capturada por los sensores en la retina $E(\lambda)$, es el producto del porcentaje de la luz reflejada por un objeto $R(\lambda)$ y la irradiancia incidente en el objeto $L(\lambda)$, la irradiancia dependerá de las coordenadas (x, y). La teoría de la Constancia del Color desde el punto de vista de la percepción del HVS utiliza la distribución espacial y cromática de cada pixel para definir los colores de la escena [8].

$$E(\lambda) = R(\lambda)L(\lambda). \quad (3)$$

La función de un sensor electrónico de video es realizar la conversión de la escena desde el punto de vista fotométrico, el cual captura el producto de la reflectancia por la iluminación. Lo que se realiza con el modelo Retinex, es imitar el mecanismo del fenómeno Constancia del Color que posee el HVS. Un punto muy importante en el mecanismo de la teoría de Constancia del Color es que no puede determinarse el color de un objeto de manera aislada, es decir, se necesita de la comparación de otras longitudes de onda reflejadas por otros objetos presentes en la escena. Por lo tanto la energía Q_i puede ser modelada por la ecuación (4).

$$Q_i = \int S_i(\lambda)R(\lambda)L(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

De esta manera los receptores transmiten la información a las células bipolares situadas en la segunda capa. Las células bipolares a su vez forman conexiones sinápticas con las células ganglionares de la retina. En la retina existen alrededor de 126 millones de foto-receptores, en donde 120 millones son bastones y 6 millones son conos. La mayoría de los conos se encuentran dentro de una pequeña área llamada fovea, que se encuentra en el centro de la retina.

2.2. Modelo Retinex

El Dr. Land desarrollo la teoría para el modelo Retinex de percepción del color, de acuerdo con este modelo, tres receptores diferentes miden la energía en diferentes puntos del espectro visible, donde cada conjunto de receptores actúa como una unidad para procesar la energía medida. En un principio el Dr. Land supuso que el proceso de interpretación del color se iniciaba en la retina con la interpretación de la corteza visual, a este sistema retino-cerebral que procesa una parte del espectro visible lo llamó Retinex, en donde los operadores que forman parte del modelo Retinex tienen la cualidad de imitar a los receptores de luz del HVS [2].

El modelo iterativo fue descrito por el Dr. Land, en el cual el modelo Retinex se describe mediante operadores biológicos encargados de la recepción de la luz y se aplican de forma iterativa a la imagen a lo largo de una trayectoria o un conjunto de trayectorias y se compara el valor de cada pixel con los pixeles vecinos [2]. Las variaciones que podemos encontrar en la literatura para este modelo se dan en la forma en cómo se van a elegir los puntos de comparación y el orden en que serán comparados [9]. Para poder encontrar la mejor aproximación del color blanco, se realiza la búsqueda de la máxima intensidad en cada canal, como se muestra en la ecuación (5).

$$I_i = \max\{f_i(x, y)\}. \quad (5)$$

La ecuación (5) se puede cambiar calculando el histograma para cada componente de color, considerando a la fuente de luz como el punto en donde existe una alta acumulación de energía. En la ecuación (1), el algoritmo Retinex simple toma en cuenta el valor máximo en cada componente de color, $\max\{f_i(x, y)\}$, para toda la imagen, y lo utiliza como el valor representativo del color blanco a ser utilizado en la respectiva componente de la imagen [10].

El otro modelo Retinex de filtrado implementado es el modelo Retinex multiescala (MSR) [11]. Este modelo se basa en el modelo Retinex de Escala Simple para obtener un Retinex multiescala (MSR) que nos da como resultado el mejoramiento del rango dinámico y el tono, el modelo matemático lo podemos observar en la ecuación (6).

$$R_i(x_1, x_2) = \sum_{k=1}^K W_k \{\log I_i(x_1, x_2) - \log [F_k(x_1, x_2) * I_i(x_1, x_2)]\}. \quad (6)$$

La ecuación (6) nos representa un algoritmo que es capaz de reducir los cambios bruscos de brillo, color y saturación. En donde i nos representa el canal actual, $*$ expresa la convolución, \log es la función logaritmo natural, (x_1, x_2) es la coordenada espacial del pixel, I_i es la imagen actual, R_i es la salida del proceso, W_k es el peso asociado con F_k , K es el número de función envolvente, en donde la función envolvente F_k está definida por la ecuación (7) [12].

$$F_k(x_1, x_2) = K \exp[-(x_1^2 + x_2^2)/\sigma_k^2], \quad (7)$$

donde, σ_k es la desviación estándar típica de las envolventes Gaussianas y su magnitud controla la extensión de la envolvente, y toda la función es normalizada según k .

Para medir la eficiencia de mejoramiento del color para cada método Retinex propuesto, se utilizara un criterio de evaluación de cromaticidad que nos permita medir la magnitud del vector de cromaticidad en el espacio de color CIELab.

3. Método de evaluación del color

Los métodos de evaluación para medir la calidad de una imagen están muy relacionados con la comparación de una versión original o bajo algún criterio de imagen ideal que se propone en la literatura, la cuantificación de la distorsión de las imágenes es necesaria en diversos campos del procesamiento de imágenes. Pero la cuantificación del color incorpora elementos psicofísicos relacionados con la percepción humana y computacionalmente la evaluación se vuelve compleja. Sin embargo, los criterios basados en modelos de sistemas de visión humana (como pueden ser CIELab, HSB, HSL y otros) tienen mejores resultados en comparación con las evaluaciones basadas en la distorsión de la imagen [13].

Para realizar la evaluación de los modelos Retinex se utiliza el espacio de color CIELab, principalmente por su uniformidad de percepción y su utilización en los modelos RGB y sRGB. El espacio de color CIELab establece que para observar los colores, estos deben observarse bajo un fondo que va del color blanco al gris con una fuente de iluminación estándar tipo D_{65} que es una fuente de luz con características similares a la luz en el medio día, y la cual tiene una temperatura de 6,504 °K [14]. Cualquier fuente que cumpla con estos datos se le denomina fuente D_{65} .

Las tres componentes del sistema CIELab se representan con los vectores L^* , a^* , y b^* , en donde estos vectores representan Luminosidad, tonalidad de rojo a verde, y tonalidad de amarillo a azul respectivamente [15].

Para poder relacionar el espacio de color RGB al espacio CIELab, especialmente las bandas amarillo-azul y rojo-verde. Estas bandas están directamente relacionadas con las diferencias de las señales en los conos presentes en la retina, como se muestran en la ecuación (8).

$$C_1 = R_a - G_a; C_2 = G_a - B_a; C_3 = B_a - R_a. \quad (8)$$

El cálculo de los vectores a, y b se muestran en la ecuación (9) [14],

$$\begin{aligned} a &= [C_1 - C_2/11] = [R_a - 12G_a/11 + B_a/11], \\ b &= (1/2)[C_2 - C_1 + C_1 - C_3]/(4.5) = (1/9)[R_a + C_2 + 2B_a]. \end{aligned} \quad (9)$$

La cromaticidad es una componente representada en las coordenadas cilíndricas del espacio de color CIELab, esta componente está representada por un vector de magnitud entre dos componentes cromáticas del espacio de color CIELab como se observa en la Fig. 1, mientras más grande sea su valor en magnitud, mayor será la distancia que existe desde el origen del espacio CIELab al pixel en observación. Esto es, entre más grande

es el valor en magnitud del vector de cromaticidad, estará indicando la saturación del color o que color es más intenso. La ecuación para la obtención del vector de cromaticidad del CIELab se muestra en la ecuación (10), que muestra el modelo característico del espacio CIELab:

$$C_{ab} = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (10)$$

donde C_{ab} representa el vector de cromaticidad, a representa la percepción cromática rojo-verde y b representa la percepción cromática amarillo-azul, como se muestra en la Fig. 1.

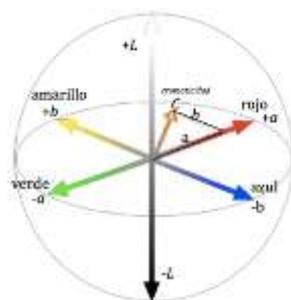


Fig. 1. Coordenadas del espacio de color CIELab.

La cromaticidad es un atributo relacionado con la intensidad del color, por tanto, entre mayor magnitud del vector de cromaticidad, mayor intensidad en el color. En esta evaluación se considera el promedio de cromaticidad en la imagen como el indicador de calidad percibida por el HVS, esto considerando que el ser humano tiende de manera natural en apreciar mejor las imágenes cuyos colores se encuentran más saturados considerándolas de mejor calidad. Por lo tanto para los resultados obtenidos, entre mayor sea el promedio de cromaticidad presente en la imagen, el color resultante de la imagen procesada será mejor [16].

4. Resultados

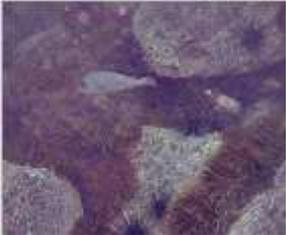
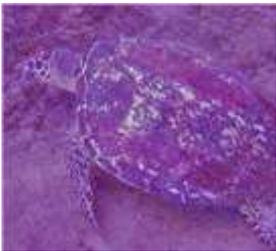
Las imágenes utilizadas como objetos de prueba, fueron procesadas utilizando dos modelos Retinex diferentes, y como resultado podemos observar subjetivamente y mediante el criterio de cuantificación sugerido, como las zonas oscuras así como la corrección del color fueron mejoradas. Posteriormente para su evaluación se realizó una transformación de la imagen del espacio RGB al espacio CIELab en sus coordenadas cilíndricas, y se calculó el promedio de la cromaticidad de la imagen. El mejor resultado se indica por el mayor valor obtenido que corresponde al algoritmo con un mejor desempeño, ya que mientras más grande es el valor del vector de cromaticidad tenemos un color más saturado, como se muestra en los resultados de cromaticidad al evaluar las imágenes procesadas con el algoritmo Retinex simple y multiescala. Las características del equipo de cómputo utilizado para la construcción de estos modelos

son las siguientes: Sistema operativo Mac OS X ver. 10.6.8, Procesador Intel Core 2 Duo 2.33 GHz con memoria RAM de 3GB. Lo anterior nos sirve como tercer criterio para la medida de la calidad de los algoritmos propuestos, al poder obtener los tiempos de procesamiento que toma cada variación del modelo Retinex, esto con el objetivo de cuantificar el tiempo de uso de los recursos computacionales por cada metodología, esto se denotará por la variable “Tp” y estará en segundos (s).

En la Tabla 1 podemos ver los resultados objetivos y subjetivos para cada imagen subacuática propuesta, al ser procesadas con los modelos Retinex simple y Retinex multiescala (MSR). El cálculo para la evaluación de cromaticidad en cada imagen se realizó utilizando la ecuación (10), primero se realizó la transformación del espacio de color RGB de la imagen a procesar al espacio de color CIELab, y se utilizaron las componentes a y b, promediados por las dimensiones de la imagen (M, N), donde M representa el número de filas y N el número de columnas, como se muestra en la ecuación (11):

$$C_{MN} = (1/MN) \sum \sqrt{a_{(x,y)}^2 + b_{(x,y)}^2}. \quad (11)$$

Tabla 1. Resultados de evaluación de los modelos Retinex.

Imagen original	Retinex Simple	Retinex MSR
 <p>Cromaticidad:170.64 Dimensiones: 500x416 Espacio de color: RGB Formato: JPG</p>	 <p>Cromaticidad:182.27 Tp: 1.3 s</p>	 <p>Cromaticidad:182.51 Tp: 6.4 s</p>
 <p>Cromaticidad: 201.60 Dimensiones: 500x454 Espacio de color: RGB</p>	 <p>Cromaticidad:188.10 Tp: 1.3 s</p>	 <p>Cromaticidad: 198.26 Tp: 6.2 s</p>

Formato: JPG		
		
Cromaticidad: 179.96 Dimensiones: 500x418 Espacio de color: RGB Formato: JPG	Cromaticidad: 187.65 Tp: 1.4 s	Cromaticidad: 183.08 Tp: 6.5 s

Se observa en los valores obtenidos de la evaluación cromática, como los modelos Retinex presentan diferente rendimiento comparando sus resultados de cromaticidad, en donde si el resultado de cromaticidad es mayor que el de la imagen procesada quiere decir que el contenido de colores es mayor, estos resultados dependieron principalmente de la iluminación homogénea o heterogénea (entendiéndose como iluminación homogénea en aquellas imágenes en donde se presenta una iluminación uniforme sobre toda la imagen y en la iluminación heterogénea se puede observar una iluminación variada sobre la misma) y del contenido de longitudes de onda de la fuente luminosa en la imagen.

5. Conclusiones

Para el procesamiento de imágenes subacuáticas, el método Retinex es una herramienta que sirvió para realizar correcciones de color en imágenes que han sido expuestas a diferentes fuentes de iluminación con diferente longitud de onda. En los resultados obtenidos podemos darnos cuenta que la eficiencia de los modelos Retinex está relacionada directamente con el contenido de longitudes de onda del que está compuesta la iluminación que afecta nuestra imagen, en donde cada modelo depende directamente de la iluminación homogénea o heterogénea y debido a estas variantes los resultados pueden tener una interpretación errónea al ser procesados con un método Retinex en particular.

En los resultados cromáticos, se observa como el método Retinex simple realiza las mejoras del contenido de color comparado el resultado con la cromaticidad de la imagen antes de procesarla, en donde la imagen esta iluminada de forma homogénea, mientras que el algoritmo multiescala realiza una mejor corrección del color de la imagen teniendo una iluminación heterogénea en la escena en comparación con el algoritmo Retinex simple.

Retinex puede ser aplicado a imágenes subacuáticas como una herramienta que realiza la corrección del color, debido a que el contenido de longitudes de onda que iluminan la escena depende de la profundidad a la que se captura la imagen ocasionando

que los colores capturados no correspondan a los colores que se obtienen bajo una iluminación tipo D_{65} .

Agradecimientos. Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional de México y al CONACyT por su apoyo para la realización del presente trabajo de investigación.

Referencias

1. G. Hines, U. Rahman, G. Woodell: Single-Scale Retinex Using Digital Signal Processors. In: Global Signal Processing Expo (GSPx) (2004)
2. E. H. Land, J. J. McCann: Lightness and Retinex Theory. *Journal of the Optical Society of America* (1971)
3. D. Jobson, A. Moore, G. Woodell: NASA/Langley Research Center/Electromagnetics and Sensors Research Branch. [Online] <http://dragon.larc.nasa.gov> (2015)
4. J. M. Morel, A. B. Petro, C. Sbert: Fast implementation of color constancy algorithms. In: SPIE (2009)
5. M. Bertalmio, V. Caselles, E. Provenzi: Issues About Retinex Theory and Contrast Enhancement. Science+Business Media, Springer (2009)
6. M. Ebner: Color Constancy. Würzburg, Germany: Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology (2007)
7. S. Seki: *Vision of the Brain*. Oxford: Wiley-Blackwell (1993)
8. A. Rizzi, C. Gatta: From Retinex to Automatic Color Equalization: issues in developing a new algorithm for unsupervised color equalization. *Journal of Electronic Imaging* (2004)
9. B. Funt, F. Ciurea: Retinex in matLaB™. *Journal of electronic imaging* (2004)
10. E. H. Land: The Retinex Theory of Color Vision. *Scientific American* (1977)
11. D. J. Jobson, Z. Rahman, G. A. Woodell: A Multiscale Retinex for Briding the Gap between Color Images and the Human Observation of Scenes. *IEEE Transactions on Image Processing* (1997)
12. Z. Rahman, D. J. Jobson, G. A. Woodell: Retinex Processing for Automatic Image Enhancement. *Journal of Electronic Imaging* (2004)
13. X. Zhang, B. A. Wandell: Colour image fidelity metrics evaluated using image distortion maps. Imaging Science and Techology Program, Department of Psychology (1998)
14. J. Schanda: *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley-Interscience (2007)
15. M. D. Fairchild: *Color Appearance Models*. Second Edition, England, John Wiley & Sons Ltd. (2005)
16. V. Tsagaris, G. Ghirstoulas, V. Anastassopoulos: A Measure for Evaluation of the Information Content in color images. In: *IEEE Inter. Conf. Imag. Process.* (2005)