

Difusión no lineal sobre imágenes de color procedentes de microscopía en campo claro

C. Platero Dueñas, G. Asensio Madrid

Grupo de Bioingeniería Aplicada, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España,
{carlos.platero,gabriel.asensio}@upm.es

Resumen

Se presenta una comparativa entre la difusión de imágenes en color empleando el tensor de Di Zenko en el sistema RGB respecto a la difusión cromática compleja del sistema HSV. Como bancada se utiliza imágenes procedentes de microscopía de campo claro para la determinación del nivel de infección de pacientes contaminados con el virus C de la Hepatitis.

1. Introducción al procesamiento de imágenes en color

Como consecuencia del avance tecnológico de los últimos años, se ha convertido factible el procesamiento de imágenes en color. El abaratamiento de los costes de las cámaras de color y el aumento de la capacidad de cálculo de los computadores han sido fundamentales para el crecimiento exponencial de aplicaciones de análisis de imágenes en color. En los últimos años, se ha dedicado muchos esfuerzos al estudio del análisis de imágenes en color. Muchas técnicas son extensiones empleadas sobre imágenes en niveles de grises; por tanto, los fundamentos de estos algoritmos están bien asentados. Por ejemplo, se ha extendido la morfología de funciones a imágenes en color [1][2]. Otras son técnicas *ad hoc* que resuelven un problema concreto. Una revisión del estado del análisis de imágenes en color puede ser abordado en [3].

Aunque el sistema de representación del color RGB es ampliamente utilizado en la transmisión de vídeo, uso en los monitores y en almacenamiento; sin embargo, no es el más adecuado para el procesamiento. Normalmente, tanto en el procesamiento marginal, canal a canal, como en el vectorial, producen falsos colores. Por otro lado, el sistema RGB es muy sensible a las condiciones de iluminación de la escena capturada.

Hay que buscar espacios alternativos al sistema de representación RGB. Destacan dos representaciones diferentes, aunque con el nexo común de separar la información cromática de la luminancia. I) CIELAB, crea un espacio de percepción uniforme y se basa en la teoría de los colores opuestos [4]. II) HSV, la información cromática se describe por las componentes de matiz y saturación [5].

La estrategia de procesamiento en color se trata de cambiar del sistema RGB a estos espacios alternativos, realizar el procesamiento en estas nuevas bases de

representación y aplicar la anti-trasformada, obteniendo la imagen de salida en el sistema RGB. Con esta estrategia se aminora el efecto de dependencia del sistema de iluminación y se evita el problema de los falsos colores. Por ejemplo, las operaciones morfológicas básicas, como erosión y dilatación, empleando estas transformaciones, coinciden con la intuición humana al aplicarla sobre las imágenes [6].

Desde este marco de trabajo, se presenta la extensión de la difusión no lineal a imágenes en color. El objetivo es el proceso de difusión, isotrópico y anisotrópico, sobre los canales cromáticos y acromáticos de la imagen, de manera que regularice la imagen.

La ponencia se organiza en cinco apartados. En el segundo punto se tratará de las técnicas de difusión sobre imágenes monocromáticas. En el tercero se abordará la extensión de la difusión a imágenes 2D en color. El cuarto apartado servirá de comparación entre el tensor de Di Zenko sobre el sistema RGB a la difusión cromática compleja de HSV. El quinto dará las conclusiones del trabajo expuesto.

2. El procesamiento de difusión no lineal en las imágenes monocromáticas

En la mayoría de las aplicaciones donde se emplean las etapas de procesamiento de imágenes, o bien se desea eliminar ruido o bien se pretende regularizar las imágenes, intentando, en ambos casos, preservar la estructura de la información de las imágenes. Durante mucho tiempo se ha estado empleando masivamente el filtrado lineal, con la ventaja del abaratamiento computacional. Sin embargo, tiene el gran inconveniente de la falta de realimentación entre qué zona de la imagen se está procesando y el filtrado al que es sometido. Regiones homogéneas, en intensidad, y contornos en la imagen son procesadas de igual manera. En esta última década ha habido un gran entusiasmo en aplicar PDEs (*Partial Differential Equations*) sobre el procesamiento de imágenes. En gran medida, por que resuelve el inconveniente anteriormente mencionado. Hay posibilidades de aplicar un filtrado dependiente de las características del área a procesar. Dentro de PDE se ha especializado con la ecuación de la difusión. Atendiendo a la analogía entre el campo escalar de las temperaturas en un proceso de difusión y el campo escalar del nivel de

gris de una imagen en un filtrado de suavizado, las dinámicas de ambos procesos responden a la expresión:

$$\partial_t u = \text{div}(\nabla u) \quad (1)$$

donde u es el potencial del campo escalar y la ecuación rige la dinámica de un proceso de difusión homogénea. Koenderink [7] se dio cuenta de que la expresión era idéntica a una convolución de la imagen con una máscara de Gauss, cuya varianza está dada por:

$$\sigma^2 = 2t \quad (2)$$

Este resultado tiene una interpretación física. El nivel de gris, es en la analogía, un nivel de temperatura y tiende a homogenizarse en el tiempo, t . Por tanto, el suavizado de la imagen depende del tiempo transcurrido y desde el punto de vista de la implementación con el valor de la varianza de la máscara de Gauss. Sin embargo, el gran salto se dará con el trabajo de Perona y Malik [8] que por primera vez se mostraba un filtrado de difusión isotrópica. El objetivo era acentuar el proceso de difusión en las zonas homogéneas y preservar los bordes:

$$\partial_t u = \text{div}\left(g\left(|\nabla u|^2\right)\nabla u\right) \quad (3)$$

siendo $g(\cdot)$ una función de $g: \mathcal{R}^m \rightarrow \mathcal{R}$ (m es la dimensión del campo escalar, u), decreciente con la magnitud del módulo del gradiente. Su valor es prácticamente nulo en los bordes y próximo a 1 en regiones con similares valores de potencial. A la función $g(\cdot)$ se la llama de la difusividad. Ha habido varias propuestas de esta función en los últimos años (ver un resumen en Guichard y Morel, [9]). En la Física, un proceso de difusión con una difusividad de tipo escalar se llama difusión isotrópica.

Con todo, esta formulación lleva consigo que en algunos puntos se dé un proceso de difusión inversa, provocando el realce puntual del ruido [10]. Weickert[11] propuso un nuevo marco de difusión donde la difusividad no sea un escalar sino un tensor de difusión:

$$\partial_t u = \text{div}(D\nabla u) \quad (4)$$

donde D es una matriz $m \times m$ simétrica y definida semi-positiva. El tensor D estará determinado por los autovectores y autovalores del tipo concreto de tensor:

$$D = RCR^T \quad (5)$$

R es la matriz de rotación y C es la matriz diagonal, cuyos elementos corresponden a los coeficientes de difusión en cada una de las componentes principales. De manera que al proyectarse el gradiente sobre el tensor, en la ecuación de la difusión, se potencie el proceso de difusión en las direcciones de menor variabilidad, esto es, en direcciones perpendiculares a la componente principal de mayor autovalor. A este tipo de difusión, donde la difusividad es un tensor y no un escalar, se la denomina anisotrópica.

Nótese que esta formulación es extensible a cualquier dimensión de la imagen. Desde una descripción unificada del filtrado de difusión [12], para una imagen de

dimensión n , $u=(u_1, u_2, \dots, u_n)^T$, la difusión isotrópica quedará establecida como:

$$\partial_t u = \text{div}\left(g\left(\sum_{j=1}^n \nabla u_j^T \nabla u_j\right)\nabla u\right) \quad (6)$$

Mientras la anisotrópica queda refundida como:

$$\partial_t u = \text{div}\left(D\left(\sum_{j=1}^n \nabla u_j \nabla u_j^T\right)\nabla u\right) \quad (7)$$

3. Difusión sobre imágenes 2D de color

El marco de trabajo expuesto está suficientemente asentado para imágenes de tipo escalar (monocromáticas). Muchos autores han propuesto extensiones desde el escenario escalar a la difusión de imágenes de tipo vectorial. En este caso concreto, se va a centrar el procesamiento de difusión a imágenes 2D de color.

La difusión marginal de imágenes en color, sobre el sistema RGB, produce efectos indeseados por que carece de información sobre la geometría local de difusión. Las condiciones que exigen la difusión no lineal son:

- La norma de un vector gradiente, dentro del campo vectorial, que indique la presencia de bordes en la imagen.
- Una base de transformación ortonormal sobre las direcciones de máxima y mínima variabilidad (2D), sobre el campo vectorial.

La geometría vectorial de Di Zenzo[13] localiza las variaciones locales empleando la norma del vector:

$$|\nabla u| = dx^T \cdot G \cdot dx \quad G = \sum_{i=1}^n \nabla u_i \cdot \nabla u_i^T \quad dx = \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} \quad (8)$$

Para el caso de imágenes 2D en el sistema RGB, el tensor de estructura de Di Zenzo está definido por:

$$G = \begin{pmatrix} R_x^2 + G_x^2 + B_x^2 & R_x R_y + G_x G_y + B_x B_y \\ R_x R_y + G_x G_y + B_x B_y & R_y^2 + G_y^2 + B_y^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

El punto de interés del tensor expuesto es que sus autovectores corresponden con las componentes principales de variabilidad. Con este simple y eficiente artefacto, Di Zenzo abre el camino natural para tratar con la geometría vectorial local. Actualmente, hay varias propuestas para la elección de la norma del vector gradiente[14]. Normalmente se emplea la ponderación de los autovalores del tensor. En este caso, la norma del vector coincide con la traza de G . Disminuyendo el tiempo de cálculo y caracterizado por preservar los bordes y las esquinas.

Una vez que la geometría local vectorial está definida, se puede emplear cualquier proceso de difusión. Por ejemplo, en la difusión anisotrópica, el tensor D estará formado por los autovectores del tensor de Di Zenzo.

Sin embargo, un planteamiento diferente sería que el proceso de difusión fuese realizado atendiendo por un lado a la información cromática y por otro a la luminancia. Este cambio se debe a que el proceso de difusión se orientase no sólo por los contornos de los objetos sino también por sus características cromáticas. Para su tratamiento se empleará el formalismo de variable compleja para la información cromática[15]. El canal matiz, por su carácter circular, representará el argumento, mientras la saturación definirá el módulo, en consonancia con la propia transformación al sistema HSV. Ambos canales constituirán un fasor complejo:

$$k(x) = \sigma(x) \cdot e^{j\theta(x)} \quad (10)$$

De esta forma, el proceso de difusión se retorna a un carácter escalar, donde se realimenta mutuamente el matiz y la saturación. La norma del gradiente que define la difusividad en cada píxel estará dirigido por:

$$|\nabla k| = \sqrt{|\nabla \sigma|^2 + \sigma^2 \cdot |\nabla \theta|^2} \quad (11)$$

De lo que se desprende que las variaciones de matiz están ponderadas por la saturación. Este efecto está en concordancia a que para bajos valores de saturación, la información de matiz no es relevante. Para regiones de colores saturados el proceso de difusión preservará los contornos entre los objetos de diferentes colores y dentro de ellos homogeneizará la cromacidad. Sin embargo, la difusión en píxeles acromáticos o en escala de grises producirá que éstos serán diluidos por los píxeles vecinos que tengan cromaticidad. Concluyendo, la difusión cromática compleja favorece la expansión de los píxeles con mayor saturación. Característica que puede ser empleada para tareas de segmentación cromática.

También es de recordar que en la difusión cromática compleja, el artificio de la geometría vectorial local no es considerado al realizar un proceso de difusión escalar, aunque sea de carácter complejo.

4. Comparativa entre la difusión cromática y la geometría de Di Zenzo

Mientras la difusión no lineal, aplicando la geometría vectorial de Di Zenzo sobre RGB, preserva los bordes de los objetos de la escena, la difusión cromática se va a centrar en la expansión de los objetos cromáticos sobre los acromáticos y prevalece las características de cromaticidad. En la figura 1 y 2 se observan dos ejemplos distintos sobre la comparativa entre el proceso de difusión empleando la norma de la traza del tensor de Di Zenzo en RGB y la difusión cromática compleja en HSV.



Figura 1. a) Imagen original, b) difusión empleando tensor de Di Zenzo, c) difusión cromática compleja

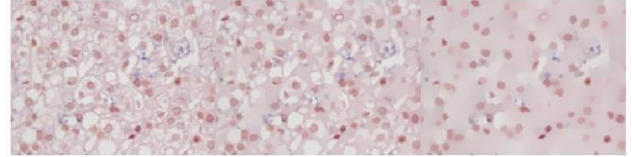


Figura 2. a) Imagen original, b) difusión empleando tensor de Di Zenzo, c) difusión cromática compleja

Para realizar la comparación se han empleado los mismos parámetros en la función de difusividad y en número de iteraciones, así como el paso de cada iteración. La evolución de la difusividad y el tamaño del paso son de carácter dinámico; realizando una difusión de ‘grano grueso a grano fino’. Con el objeto de mantener la estabilidad del algoritmo, en relación a la amplitud del paso en cada iteración, se ha utilizado el escenario numérico de discretización semi-implícito AOS (*Additive Operator Splitting*)[16].

Las ventajas de la difusión cromática compleja se observa en el proceso de segmentación cromática. En la aplicación realizada para la determinación del nivel de infección del virus C de la hepatitis sobre pacientes, se precisa de la contabilidad de hepatocitos y señales de virus C extraídos de biopsias de hígado. Los hepatocitos tienen una tonalidad rojiza mientras el virus se aproxima a un color azulado. Empleando técnicas *kmeans* sobre los resultados de la difusión cromática y la difusión basada en el tensor de Di Zenzo se observan las diferencias ya apuntadas. Las peculiaridades cromáticas de los hepatocitos y las señales víricas quedan realzadas en la difusión cromática, no así en la difusión empleando el sistema RGB (ver figura 2).

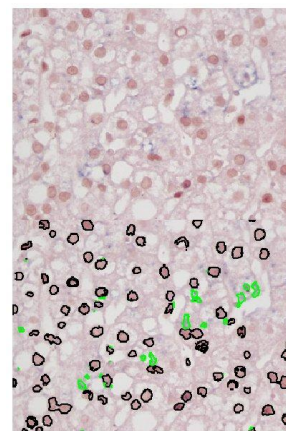


Figura 3. Segmentación de hepatocitos y virus C empleando sólo el canal de difusión cromática

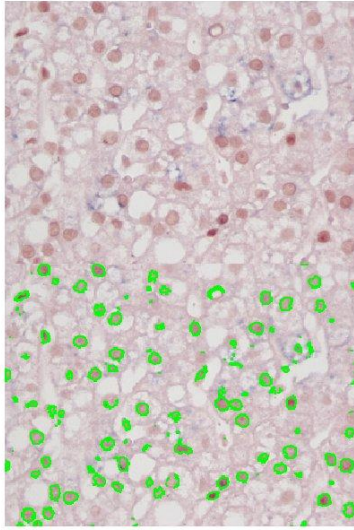


Figura 4. Resultados de clustering procedente de la difusión geométrica de Di Zenzo

En el proceso de clustering se ha predefinido cuatro grupos y se ha empleado la distancia euclídea para la clasificación no supervisada. En el caso de la difusión cromática compleja, la entrada al algoritmo de agrupación fue el canal cromático (matiz y saturación). Por el contrario, en la difusión, con traza del tensor de Di Zenzo, se empleo por cada píxel la terna RGB.

5. Conclusiones

Se ha presentado una comparativa entre el marco de difusión de imágenes en color entre la geometría local vectorial de Di Zenzo en RGB y la difusión cromática compleja en HSV. Ambas tienen sus peculiaridades. La primera tiene en cuenta los bordes de los objetos presentes en la imagen, sin consideraciones relevantes sobre su cromaticidad; mientras la segunda actúa con una difusión alta sobre píxeles de colores insaturados. La preservación de los bordes es menor si los objetos tienen tonalidades grisáceas.

Por las características cromáticas de las imágenes capturadas de biopsias de hígados para las cuantificaciones de la infección del virus C de la hepatitis sobre los pacientes, se ha utilizado la difusión cromática compleja para la segmentación de hepatocitos y señales de virus C.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación para el Estudio de las Hepatitis Virales la cesión de las imágenes que se han empleado para este trabajo.

Referencias

- [1] Hanburry, A., Serra, J., *A 3D-polar coordinate colour representation suitable for image analysis*, technical report PRIP-TR-077, TU Wien, 2002.
- [2] Ortiz, F., *Procesamiento morfológico de imágenes en color. Aplicación a la reconstrucción geodésica*, Tesis doctoral, Universidad de Alicante, 2002.
- [3] Lucchesse, L., Mitra, S.K., *Color Image Segmentation: A State-of-the-Art Survey*, Proc. of the Indian National Science Academy (INSA-A), New Delhi, India, Vol. 67 A, No. 2, pp. 207-221, 2001.
- [4] Mahy, M., Van, B., Van, L., Oosterlinck, A., *The influence of uniform color spaces on color image processing: A comparative study of CIELAB, CIELUV, and ATD*, J. Imaging Tech. 17, 5, 232-243, 1991.
- [5] Poynton, C., *Frequently asked questions about color*. Disponible en Internet. <http://www.inforamp.net/~poynton>.
- [6] Hanburry, A., *Lexicographical Order in the HLS Colour Space*, technical report N04/01/MM Centre de Morphologie Mathématique, Ecole de Mines de Paris, 2001.
- [7] Koenderinh, J.J., *The structure of image*, Biological Cybernetics, 50, 363-370, 1984.
- [8] Perona, P., Malik, J., *Scale space and edge detection using anisotropic diffusion*, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12(7), 629-639, 1990.
- [9] Guichard, F., Morel, J-M, *Image Analysis and PDE's*, versión 27/3/2001. Sin publicar. Disponible en Internet.
- [10] Kawohl, B., Kutev, N., *Maximum and comparison principles for anisotropic diffusion*, Mathematical Institute, Universidad de Colonia, 1997.
- [11] Weickert, J., *Coherence-enhancing diffusion filtering*, International Journal of Computer Vision, 31, 111-127, 1999.
- [12] Weickert, J., Brox, T., (2002) *Diffusion and Regularization of Vector and Matrix Valued Images*, preprint n° 58, Saarbrücken, 2002.
- [13] Di Zenzo, S., *A note on the gradient of a multi-image*. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 33:116-125, 1986.
- [14] Tschumperlé, D., Deriche, R., *PDE's based regularization of multivalued Images and Applications*, Tesis doctoral de la Universidad de Nice-Sophia Antipolis, 2002.
- [15] Lucchesse, L., Mitra, S.K., *Color Segmentation Based on Separate Anisotropic Diffusion of Chromatic and Achromatic Channels*, IEEE Vol. 67 A, No. 2, pp. 207-221, 2001.
- [16] Weickert, J., Haar Romeny, B.M., Viergever, M.A., *Efficient and reliable schemes for nonlinear diffusion filtering*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 7, 398-410, 1998.