

УДК 004.932/510.22

НЕЧЁТКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА ШТРИХОВАННОГО РИСУНКА ПО ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАФИИ

А. В. Григорьев

В публикации предложены две модификации метода (чёткая и нечёткая) формирования штрихованного рисунка по цветной фотографии. Суть метода состоит в разбиении изображения на сегменты и заполнении каждого сегмента некоторым видом штриховки. Нечёткая модификация отличается от чёткой мягкими процедурами сегментации и заполнения областей штриховками, и позволяет получить более естественный штрихованный рисунок.

Ключевые слова: нечёткая обработка изображений, художественные эффекты, штрихованный рисунок.

Введение. Одним из наиболее актуальных приложений методов цифровой обработки изображений в настоящий момент является художественная обработка цифровых фотографий или видео. Особое место среди используемых в данном виде обработки эффектов занимают преобразования, позволяющие создавать иллюзию того, что обработанное изображение получено некоторым способом, отличным от использованного в действительности. К их числу можно отнести эффекты, описанные в [1, 2], и создающие впечатление того, что исходное изображение нанесено акварельными красками (акварелирование) или получено выдавливанием на некоторой поверхности (тиснение).

К описанной категории художественных эффектов относится и преобразование, созданию которого посвящена данная статья. Разрабатываемый художественный эффект должен изменять «реальную» цифровую фотографию таким образом, чтобы создавалось впечатление, что её содержимое нанесено простым карандашом или углем при помощи техники штриховки. Данная задача может найти своё применение в таких приложениях, как веб-дизайн, художественное оформление фотоматериалов, при создании мультфильмов и кинематографических спецэффектов, а также в игровой индустрии. В настоящий момент создание эффекта рисунка, нанесенного карандашом, в частности, в такой системе, как AKVIS Sketch [3], и ряде фильтров системы Photoshop, используется выделение границ цифровыми фильтрами Собеля, Превита или Лапласа.

В данной работе предложен метод синтеза рисованного изображения по цифровой фотографии, который, в отличие от существующих, не использует выделение границ, а основан на подходе, объединяющем методы цифровой обработки изображений и теорию нечётких множеств [4, 5]. Описание метода разбито на два этапа. На первом этапе описывается «чёткая» модификация предлагаемого метода, позволяющая продемонстрировать сам принцип построения штрихованных изображений. На втором этапе анализируются недостатки предложенного «чёткого» метода, обусловленные использованием обычных множеств, предлагается устранение выявленных недостатков путём перехода к нечёткой модификации метода.

Чёткий метод построения штрихованных изображений. Основная идея предлагаемого метода заключается в разбиении исходного изображения на однородные по некоторому признаку (или группе признаков) области, каждая из которых будет заполнена соответствующей штриховкой. Заполнение производится заменой выделенных областей фрагментами заранее подготовленных изображений, соответствующих выбранной штриховке. Выделенные области (сегменты), при этом, играют роль маски, задающей пиксели исходного изображения, которые должны быть заменены соответствующей штриховкой. Формально чёткую модификацию предлагаемого метода можно представить следующим образом.

На пиксельной плоскости $P = \{(i, j) \mid i \in \{1, 2, \dots, N\}, j \in \{1, 2, \dots, M\}\}$ задано исходное изображение $f: P \rightarrow [0, 1]$, а также семейство заранее подготовленных изображений-штриховок $g_k: P \rightarrow [0, 1]$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$. Все исходные изображения заданы функциями, принимающими значения от 0 до 1. Отметим, что для удобства последующих вычислений для представления яркости в отдельных точках пиксельной плоскости нами взята не традиционно используемая функция яркости, а её инверсия (назовём её «функцией нажима», поскольку она моделирует силу нажатия на грифель карандаша). Таким образом, в использованном нами представлении яркости отдельных пикселей 1 означает чёрный цвет, а 0 – белый.

На первом этапе обработки при помощи классификаторов F_k , $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, каждый из которых преобразует исходное изображение $f: P \rightarrow [0, 1]$ в бинарное изображение $f_k: P \rightarrow \{0, 1\}$:

$$f_k = F_k(f), \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}. \quad (1)$$

Как было сказано ранее, семейство полученных изображений f_k задаёт разбиение пиксельной плоскости в том смысле, что набор множеств $A_k = \{x \mid f_k(x) = 1\}$, задающих чёрные пиксели соответствующих бинарных изображений f_k , удовлетворяют следующим условиям:

$$A_i \cap A_j = \emptyset, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, K\} : i \neq j; \quad (2)$$

$$\bigcup_{k=1}^K A_k = P. \quad (3)$$

Каждое из множеств A_k представляет собой набор точек пиксельной плоскости, заполненных в обработанном изображении штриховкой g_k . Заполнение выполняется заданием на всех точках $x = (i, j) \in A_k$ обработанного изображения функции нажима $g[i, j] = g_k[i, j]$.

Поскольку набор множеств A_k составляет разбиение пиксельной плоскости, предложенная процедура штриховки позволяет однозначно задать значение функции нажима в каждом пикселе обработанного изображения. При этом несложно заметить, что функции нажима f_k являются характеристическими функциями множеств A_k . Таким образом, функция нажима g итогового штрихованного изображения может быть представлена выражением:

$$g[i, j] = \sum_{k=1}^K f_k[i, j] \cdot g_k[i, j]. \quad (4)$$

Пример применения чёткого метода синтеза штрихованных изображений продемонстрирован на рис. 1. В целом, полученное изображение неплохо передаёт при помощи штриховки образ куба, изображённый на исходном изображении. Выбранные виды штриховки обеспечивают ощущение контраста соседних граней куба.

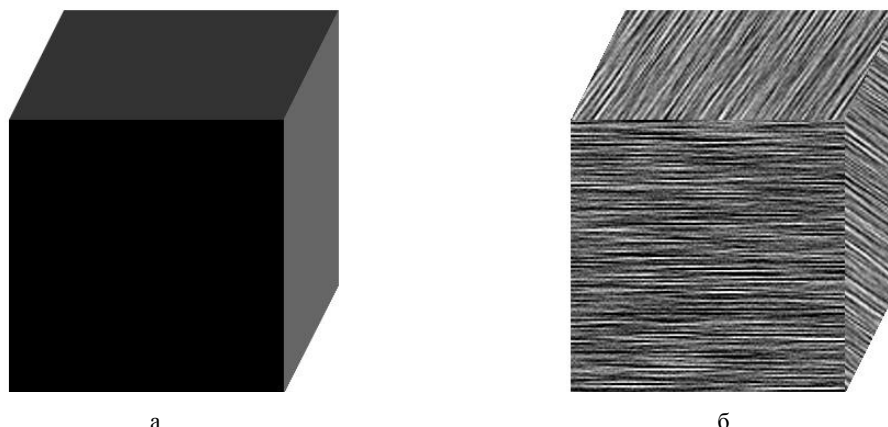


Рис. 1. Демонстрация «чёткого» синтеза штрихованного изображения
а) – исходное изображение; б) – обработанное

Однако при оценке полученного результата следует учитывать, что мы имеем дело не с реальной фотографией, а с образом идеальной геометрической фигуры, сформированным при помощи графического редактора с использованием достаточно узкого набора цветов.

При использовании же описанного метода к реальным изображениям (рис. 2) не создаёт впечатления реального штрихованного рисунка, а результат обработки скорее походит на псевдотонирование полноцветного изображения. Можно выделить следующие причины «не реалистичности» штрихованных изображений, сформированных «чётким» методом при обработке полноцветных фотоизображений.

Описанный метод предполагает разбиение изображения на ряд непересекающихся областей с последующим нанесением соответствующей штриховки на каждую из них. При этом невозможно передать плавный перепад яркости от одной области изображения к другой. В зависимости от того, попадают ли пиксели данных областей в один и тот же или в разные подмножества разбиения, возможно два случая. В первом случае за счёт того, что будет использовано несколько контрастирующих друг с другом штриховок, теряется плавность перепада яркости (плавный переход просто подменяется резким). Во втором случае вообще не будет перехода (обе области и переход между ними будут заполнены одной и той же штриховкой).

Также во многих случаях невозможно передать резкий перепад между близкими по яркости областями изображения, попадающими при разбиении в одно и то же подмножество (при штриховке такие области просто сольются).

Кроме того, отметим, что использование для заполнения отдельных областей одного вида штриховки делает изображение менее реалистичным, поскольку на практике художники используют комбинации из нескольких штриховок, ориентированных под различными углами.



Рис. 2. Применение «чёткого» синтеза штрихованного изображения к реальному фотоизображению
а) – исходное изображение; б) – обработанное

Нечёткий метод построения штрихованного изображения. Выявленные недостатки могут быть преодолены переходом к нечёткой модификации предложенного метода. Для этого воспользуемся стандартным для данной ситуации приёмом [6], суть которого состоит в расширении понятия характеристической функции обычного множества до функции принадлежности нечёткого множества.

В представленном выше «четком» методе было расширено понятие разбиения пиксельной плоскости на ряд обычных подмножеств, каждое из которых задавало область изображения, заполняемую в синтезированном изображении определённым видом штриховки. В нечёткой модификации данные множества A_k были заменены нечёткими множествами A_k . Функция принадлежности $\mu_{A_k}(i, j)$, заданная на элементе (пикселе) $(i, j) \in P$, выражает субъективную уверенность в том, что выбранный элемент множества (пиксель изображения) должен быть заполнен штриховкой g_k .

Использование нечётких множеств позволяет, с одной стороны, при нанесении штриховки варьировать степень нажима в зависимости от функции принадлежности (максимальное значение функции принадлежности соответствует максимальной степени нажима, минимальное – минимальной). С другой стороны, использование нечёткого подхода позволяет сделать «плавным» переход от одной штриховки к другой с изменением яркости пикселей исходного изображения. Так, при «чётком» подходе в области значений яркости, соответствующей переходу от одной штриховки к другой, до некоторого порогового значения чётко используется одна штриховка, после порогового значения – чётко другая. При нечётком подходе – на всей области перехода используется обе штриховки, меняется лишь их степень нажима. Здесь в «пороговой» точке применяются обе штриховки с равной степенью нажима, а при удалении от неё – наблюдаем ослабление нажима для одной из двух штриховок, и усиление – для другой. Таким образом, в нечётком случае, в результате сегментации получим набор областей, представленных нечёткими множествами $S = \langle A_1, \dots, A_K \rangle$ и заполняемых различными штриховками.

Строго говоря, набор S нечётких подмножеств не является разбиением P , поскольку пересечение «соседних» множеств в общем случае не пусто, и объединение всех множеств не даёт P . В связи с этим, необходимо дать альтернативное определение разбиения, позволяющее обобщить его на случай разбиения множества нечёткими подмножествами. Введенное в данной публикации нечёткое разбиение названо *нечётким γ -разбиением*. При определении данного объекта использовались следующие соображения. С одной стороны, γ -разбиение должно быть обобщением обычного разбиения, т.е. в случае использования в качестве нечётких множеств в γ -разбиении только обычных множеств (как частного случая нечётких), описанный объект должен являться обычным разбиением. С другой стороны, при использовании обобщения выражения (4) должна получаться «мягкая» зарисовка каждого пикселя изображения,

при этом, полученное преобразование должно быть замкнутым относительно используемого диапазона функции нажима, и повсеместным – т.е. применяться ко всей пиксельной плоскости P .

Как видно из выражения (4), значение функции нажима в обработанном изображении представляет собой линейную комбинацию значений функций нажима эталонов-штриховок в этой же точке. В качестве коэффициентов выбираются значения характеристических функций множеств A_k на элементе, соответствующем обрабатываемому пикселю. При переходе к нечёткому виду, характеристические функции расширены до функций принадлежности. Для того, чтобы полученное значение нажима для каждого пикселя изображения осталось в исходном диапазоне значений, необходимо, чтобы сумма коэффициентов линейной комбинации (функций принадлежности из γ -разбиения) равнялась единице.

Отметим, что при равенстве единице суммы функций принадлежности множеств γ -разбиения на всей пиксельной плоскости (на всех элементах универсального множества) будет выполнено и первое условие. В случае использования в разбиении только обычных множеств, очевидно, для каждого пикселя плоскости P , с одной стороны, обязательно будет существовать такое множество разбиения, которое этот пиксель включает в себя. С другой стороны – такое множество будет единственным, поскольку в противном случае сумма характеристических функций множеств, включающих в себя заданный пиксель, будет больше единицы.

Таким образом, определение γ -разбиения можно представить в следующем виде.

Определение 1. *Нечётким γ -разбиением* обычного множества P называется набор $S = \langle A_1, \dots, A_K \rangle$ нечётких подмножеств P , для которого выполнено:

$$\sum_{k=1}^K \mu_{A_k}(i, j) = 1, \forall (i, j) \in P.$$

Тогда выражение (4) можно переписать в виде:

$$g[i, j] = \sum_{i=1}^K \mu_{A_i}(i, j) \cdot g_k[i, j] = 1, \tag{5}$$

а процедура формирования штрихованного изображения по цифровой фотографии выглядит так:

1. Переход от цветного изображения к функции нажима. Для этого используется негатив канала Y исходного цветного изображения, представленного в цветовой схеме YCrCb.

2. Получение нечёткого γ -разбиения $S = \langle A_1, \dots, A_K \rangle$ пиксельной плоскости P (нечеткая сегментация). При проведении экспериментов, результаты которых представлены на рис. 3 на этой стадии использована цветовая сегментация (в нечёткой интерпретации – фаззификация функции нажима по каждому пикселю изображения). Для фаззификации использовались функции треугольного вида, подчиняющиеся в совокупности определению γ -разбиения. В общем случае на данном этапе может быть использована более сложная процедура, включающая также текстурную сегментацию, сегментацию с учётом связности выделяемых областей и анализ контекста.

3. К полученному γ -разбиению и заранее подготовленным эталонам-штриховкам применено выражение (5).

4. Полученная на этапе 3 функция нажима переводится при помощи преобразования негатива к функции яркости серого изображения.

Результаты применения нечёткого метода представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, изображения, обработанные нечётким методом, имеют более естественный вид и визуально более похожи на изображения, нарисованные простым карандашом методом нанесения штриховки.



а



б



в



г

Рис. 3. Результат применения нечёткого метода формирования штрихованного изображения
а), в) – исходные изображения; б), г) – результаты обработки

Выводы. В публикации предложен метод построения штрихованного изображения на основе цифровой фотографии, а также его нечёткая модификация. Обосновано и практически установлено, что нечёткая модификация позволяет получать более естественные штрихованные изображения. Дальнейшие исследования в данной области могут быть связаны с совершенствованием построения нечёткого разбиения исходного изображения за счёт добавления новых признаков – таких как анализ ориентации областей, полученных при сегментации, и текстурного анализа, а также добавления поддержки различных видов штриховки для различных видов текстур, например, барашковой штриховки для обозначения воды или неба.

РЕЗЮМЕ

В публікації запропоновані дві модифікації методу (чітка і нечітка) формування штрихованого малюнка за кольоровою фотографією. Суть методу полягає у розбитті зображення на сегменти і заповнення кожного сегмента деяким видом штрихування. Нечітка модифікація відрізняється від чіткої м'якими процедурами сегментації та заповнення областей штриховками, й дозволяє отримати більш природній штрихований малюнок.

Ключові слова: нечітка обробка зображень, художні ефекти, штрихований рисунок.

SUMMARY

In the publication two modifications of the approved method (crisp and fuzzy) of digital photo to a hatched picture transform offered. Approved method consists of segmenting a source image with followed filling of every segment by some hatch pattern. Fuzzy modification differs from crisp by use of soft segmentation and filling procedures, and allows getting more natural hatched picture.

Keywords: fuzzy images processing, artistic effects, hatchet images.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Лукин А. Введение в цифровую обработку сигналов. (Математические основы) / А. Лукин. – М.: МГУ, 2007. – 54 с.
3. Устин В. Б. Композиция в дизайне. Методические основы композиционно-художественного формообразования в дизайнерском творчестве / В. Б. Устин. – М.: Астрель, 2007. – 239 с.
4. Nachttegael M. Fuzzy Filters for Image Processing / M. Nachttegael, D. van der Weken, D. Ville. – Berlin: Springer-Verlag, 2003. – 386 p.
5. Kerre E. Fuzzy techniques in image processing / E. Kerre, M. Nachttegael. – New-York: Springer Verlag, 2000. – 422 p.
6. Wang X. Mathematics of fuzziness – basic issues / X. Wang, D. Ruang, E. Kerre. – Berlin: Springer Verlag, 2009. – 219 p.

Поступила в редакцию 26.05.2010 г.