

Формирование признакового описания фактуры картин*

*Д. М. Мурашов*¹, *А. В. Березин*², *Е. Ю. Иванова*²
d_murashov@mail.ru, berezin_alex@mail.ru

¹Москва, Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН; ²Москва, Государственный Исторический музей

Рассматривается задача формирования признакового пространства для сравнения изображений в атрибуции произведений живописи. Предложено признаковое описание фактуры картин на основе характеристик хребтов полутонового рельефа, элементов структурного тензора и значений локальных волновых чисел. В отличие от известных разработок признаковое описание формируется только по информативным фрагментам изображений и не требует предварительной сегментации отдельных мазков кисти. Проведены вычислительные эксперименты. Предложенное признаковое описание позволит получить количественную характеристику стиля живописи автора и наряду с другими видами исследования картин сформировать атрибуционное заключение.

Ключевые слова: *фактура картин, признаки изображений, локальная ориентация хребтов изображения, структурный тензор, мера когерентности, преобразование Рисса, атрибуция картин.*

Composing feature description of paintings texture*

*D. M. Murashov*¹, *A. V. Berezin*², *Y. Yu. Ivanova*²

¹Moscow, Dorodnicyn Computing Centre of RAS; ²Moscow, State Historical Museum

A task of composing a feature description of texture of paintings for the purposes of attribution is considered. A feature description for comparing texture fragments based on ridges of grayscale image relief, structure tensor, and local wave number is proposed. As compared to conventional techniques, the selected features are computed only in informative image fragments and do not require brush stroke segmentation. The results of computing experiments showed the efficiency of the proposed feature set. The feature set gives quantitative description of painter's artistic style and provides suitable accuracy of feature computing. The proposed feature set may be used as a part of technological description of fine art paintings for attribution.

Keywords: *texture of paintings, image features, local orientation of image ridges, structure tensor, coherency measure, Reisz transform, attribution of paintings.*

Введение

Рассматривается задача сравнения изображений для целей атрибуции произведений живописи. Под термином «атрибуция» понимается определение принадлежности неподписанного художественного произведения тому или иному автору, школе, времени, стране и т. д. [1].

Одно из направлений исследований в атрибуции связано с анализом цифровых изображений картин. Важнейшим техническим признаком картины является фактура. Понятие фактуры определено как видимое поверхностное строение картины [2]. Идея применения методов анализа изображений в атрибуции заключается в сравнении изображений

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 12-07-00668.

аутентичных картин и исследуемой картины по признакам, характеризующим индивидуальность художника.

В публикациях различных исследовательских групп предложено несколько подходов к решению рассматриваемой задачи. Один из подходов основан на переборном сравнении квадратных фрагментов, на которые разбиваются оба исследуемых изображения [3]. Признаками, как правило, служат коэффициенты ортогональных преобразований (в частности, вейвлет-преобразований). Такие методы требуют больших вычислительных затрат и весьма чувствительны к условиям получения изображений и параметрам аппаратных средств [4]. В работах [5] и [6] на изображениях находятся специфические объекты, по которым сравниваются изображения. Такими объектами являются отдельные мазки кисти художника. Однако выделить в автоматическом режиме отдельные мазки удастся далеко не на всех полотнах. Это удастся сделать, например, на картинах Ван Гога и некоторых других. Поэтому предпочтительно использовать признаки, для вычисления которых не требуется сегментация отдельных мазков.

Индивидуальность художника проявляется в особенностях мазков кисти, обусловленных системой наложения мазков, выбором кистей, нажимом. Индивидуальность выявляется также в подходе к проработке света, полутени и тени, в соотношении расположения мазков по границам формы и фона, а также по границам отдельных деталей [7].

В соответствии с рекомендациями искусствоведов предлагается в качестве образцов для сравнения использовать группу мазков, формирующих какую-либо деталь, или границы касания предметов друг с другом и фоном.

Задача формулируется следующим образом. Требуется сравнить изображения по набору признаков, вычисляемых на информативных фрагментах. Предполагается, что имеется два изображения (эталонное и тестовое), на которых присутствуют группы информативных фрагментов, принадлежащих некоторому классу (например, фрагменты на которых изображен нос или другая часть лица, фрагменты с деталями одежды). Каждый класс характеризуется определенным набором признаков. Число классов априори не известно. Необходимо: выделить на изображениях информативные объекты; классифицировать эти объекты и установить соответствие объектов одинаковых классов на изображениях; сравнить соответствующие фрагменты по выбранному набору признаков.

Решение задачи состоит из следующих этапов: (а) поиск однотипных информативных фрагментов на сравниваемых изображениях; (б) вычисление признаков; (в) сравнение найденных однотипных фрагментов; (г) заключение о схожести изображений по множеству найденных фрагментов.

Данная работа посвящена этапам (б) и (в) задачи сравнения изображений картин. Выбраны отличные от предложенных ранее элементы признакового описания, отражающего стиль живописи художника, и предлагается методика сравнения информативных фрагментов картин. Представлены результаты вычислительных экспериментов.

Исходные данные

Исходными данными являются цветные изображения фрагментов картин (портретов), выполненных разными художниками XVIII–XIX вв. Изображения фиксируются цифровой фотокамерой. Размеры фрагментов (например, лиц) составляют 4272×2848 пикселей. Размеры используемых в данной работе информативных областей составили около 1800×1000 пикселей. Разрешение составило 200 точек на 1 см, что соответствует качеству исходных данных для такого рода исследований. Так, в аналогичных работах [3], [4] и [6] иссле-

довались изображения с разрешением 196 точек на дюйм. На полученных изображениях корректировались искажения, обусловленные процессом съемки.

Признаковое описание фактуры картин

С учетом рекомендаций искусствоведов и анализа публикаций по тематике настоящего исследования будут использованы признаки, не связанные с сегментацией отдельных мазков кисти, которые будут извлекаться только из областей изображения, содержащих максимум информации о технике живописи художника. В представляемой работе предлагается использовать текстурные и частотные признаки информативных фрагментов. Для описания индивидуальных особенностей техники живописи предлагается использовать следующие признаки: локальная ориентация хребтов полутонового рельефа изображения, локальные признаки на основе структурного тензора (локальная ориентация и когерентность); локальные волновые числа. Локальная ориентация и когерентность характеризуют манеру живописи художника, специфическую для конкретных деталей картины. Волновое число связано с геометрическими характеристиками кисти, которую использовал автор в процессе формирования красочного слоя рассматриваемого фрагмента (толщина волоса, ширина кисти).

Гистограмма направлений хребтов мазков. В качестве характеристики группы мазков предлагается рассматривать гистограмму направлений хребтов мазков. Гистограмма направлений хребтов мазков может быть получена непосредственно из изображения и не требует операции сегментации отдельных мазков. Гистограмма формируется по значениям составляющих градиента уровней полутонов в точках, расположенных на хребтах информативных фрагментов. Хребты локализуются на основе метода, описанного в [8]. Множество точек, образующих хребет объекта полутонового изображения, дополнено параболическими и омбилическими точками поверхности, аппроксимирующей рельеф изображения.

Модель мазка представляется в виде поверхности, описываемой функцией $f(x, y)$, $f \in C^2(\mathbb{R}^2, \mathbb{R})$. Предполагается, что градиент $Df \neq 0$, $Df = (f_x, f_y)^T$. Введем обозначения $N = Df/|Df|$, $T = Df^\perp/|Df|$, $Df^\perp = (-f_x, f_y)^T$, где N и T – нормальный и касательный векторы к линиям уровня (изофотам) f . Имеет место следующее выражение на основе матрицы Гессе D^2f функции $f(x, y)$ [8]:

$$-\frac{1}{|Df|} \begin{bmatrix} N^T D^2 f N & N^T D^2 f T \\ T^T D^2 f N & T^T D^2 f T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g & \mu \\ \mu & k \end{bmatrix},$$

где $k = -T^T (D^2 f / |Df|) T$ – кривизна изофоты, а $\mu = -T^T (D^2 f / |Df|) N$ – кривизна линий потока яркости; $g = -N^T (D^2 f / |Df|) N$ – мера изменения величины градиента вдоль линий потока. Точки, образующие хребты f удовлетворяют условиям: $\mu = 0$ и $k > \max(0, g)$. Примеры фрагментов красочного слоя и карт хребтов показаны на рис. 1 и рис. 2. Полученные хребты дефрагментируются на непересекающиеся связные компоненты.

Для получения гистограммы направлений хребтов вычисляется угол ориентации осей инерции связных компонент хребтов [9]:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\mu_{1,1}}{\mu_{2,0} - \mu_{0,2}},$$



Рис. 1: Пример фрагментов изображений портретов разных авторов

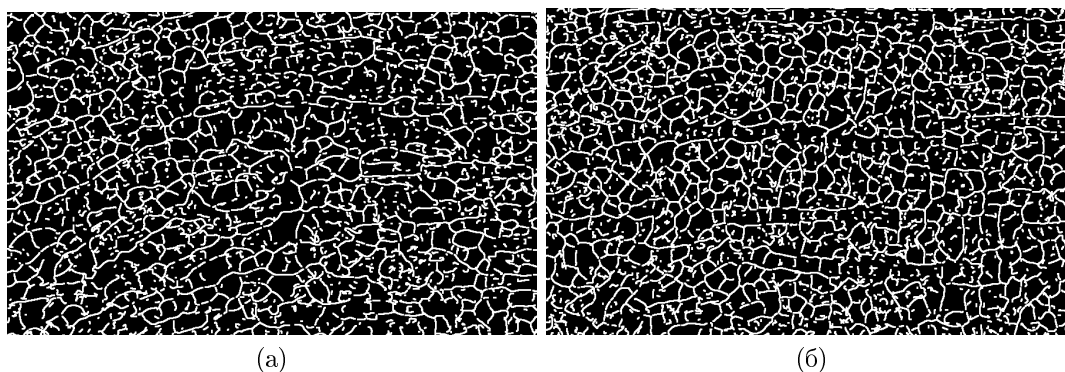


Рис. 2: Изображения хребтов фрагментов, показанных на рис. 1

где $\mu_{i,j}$ — компоненты тензора инерции объекта

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mu_{2,0} & -\mu_{1,1} \\ -\mu_{1,1} & \mu_{0,2} \end{bmatrix}.$$

При построении гистограммы направлений учитывалась длина (в пикселях) связных компонент хребтов. Полученные гистограммы представлены на рис. 3. Значения углов находятся в интервале от 0 до 180° . Из рисунка видно различие распределений углов наклона осей инерции.

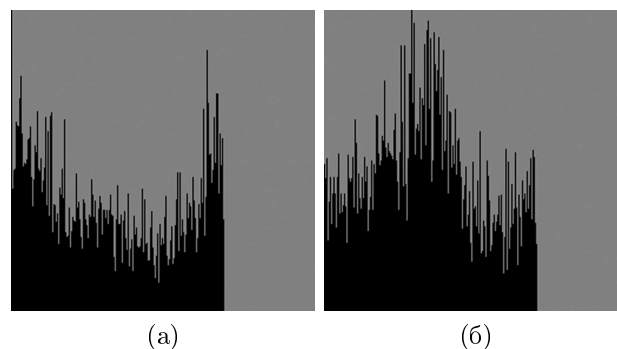


Рис. 3: Гистограммы ориентации хребтов фрагментов, показанных на рис. 1

Признаки на основе структурного тензора. Другой признак, характеризующий локальную ориентацию текстуры картины, – локальная ориентация окрестности, определяемая структурным тензором (матрицей вторых моментов в точке \mathbf{x} , взвешенной оконной функцией):

$$\boldsymbol{\mu}_f(\mathbf{x}) = \int_{z \in \mathbb{R}^2} (\mathbf{D}f(z)) (\mathbf{D}f(z))^\top w(\mathbf{x} - z) dz,$$

где $w(\mathbf{x} - z)$ – оконная гауссова функция [10]. Угол локальной ориентации φ $\boldsymbol{\mu}_f(\mathbf{x})$ определяется аналогично углу ориентации осей инерции θ :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arctan \frac{2\mu_{f1,1}}{\mu_{f2,0} - \mu_{f0,2}},$$

где $\mu_{fi,j}$ – компоненты структурного тензора

$$\boldsymbol{\mu}_f = \begin{bmatrix} \mu_{f2,0} & -\mu_{f1,1} \\ -\mu_{f1,1} & \mu_{f0,2} \end{bmatrix}.$$

В [3] локальная ориентация текстуры определялась по энергии откликов 12 ориентированных фильтров Габора. Используемый в данной работе метод на основе матрицы вторых моментов позволяет оценить угловые величины с точностью в пределах одного градуса при размере окна 5 пикселей и $\sigma = 1$. Для фрагментов, приведенных на рис. 1, гистограммы локальной ориентации, полученные с использованием матрицы вторых моментов, показаны на рис. 4.

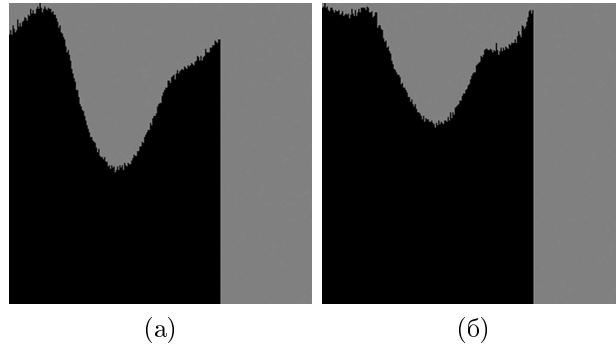


Рис. 4: Гистограммы локальной ориентации текстуры для фрагментов, показанных на рис. 1

Локальная мера когерентности градиентов изображения вычисляется по формуле [9]:

$$c_c = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2},$$

где λ_1, λ_2 – собственные значения матрицы вторых моментов $\boldsymbol{\mu}_f$ в точке \mathbf{x} . Локальная мера когерентности применяется для формирования маски областей, в которых будет вычисляться угол локальной ориентации φ текстуры.

Локальное волновое число. Значение локального волнового числа определяется из выражения [9]:

$$k_w = \frac{p(q_{1x} + q_{2y}) - q_1 p_x - q_2 p_y}{p^2 + q_1^2 + q_2^2},$$

где p , q_1 и q_2 – составляющие моногенного сигнала [11], получаемого из изображения преобразованием Рисса, а p_x , p_y , q_{1x} и q_{2y} – частные производные этих составляющих по пространственным координатам.

Сравнение фрагментов изображений

Для сравнения фрагментов изображений произведений живописи применяются методы статистического анализа [6], методы кластерного анализа и распознавания [3], [4]. Так как музеи, как правило, не располагают достаточным количеством картин одного автора, то затруднительно получить достаточное количество данных для обучения классификаторов. В этом случае для сравнения фактуры картин применяются статистические тесты. Например, в работе [6] при помощи перестановочного теста проверяется гипотеза о равенстве средних значений признаков, вычисленных по изображениям исследуемых картин. В представляемой работе Фрагменты изображений будут сравниваться с помощью статистических тестов и теоретико-информационной меры различия.

Для сравнения фрагментов по распределениям угла ориентации хребтов применялся тест Смирнова [12]. Полученные гистограммы являются приближениями плотности вероятности углов ориентации θ , построенными по выборкам их значений $\vartheta_{11}, \dots, \vartheta_{1m}$ и $\vartheta_{21}, \dots, \vartheta_{2n}$, вычисленных для однотипных фрагментов двух разных картин. Пусть $F(\theta_1)$ и $G(\theta_2)$ – эмпирические функции распределения, построенные по гистограммам рассматриваемых угловых величин для фрагментов двух картин. Предполагается, что выполнены все предположения о выборках случайных величин и их функциях распределения [13]. В качестве нулевой гипотезы H_0 выдвигается гипотеза об однородности функций распределения величин θ_1 и θ_2 против гипотезы неоднородности H_1 . Статистикой критерия служит величина $D = \sup |F(\theta) - G(\theta)|$. Гипотезу H_0 следует отвергнуть, если $D > d$, где d – величина, зависящая от значения функции распределения Колмогорова при данных m и n и выбранном уровне значимости α .

Получены результаты тестирования признаков фактуры однотипных фрагментов двух портретов кисти Ф. Рокотова и двух портретов других авторов VIII–XIX веков. Значения статистики D критерия Смирнова для распределений угла ориентации хребтов однотипных фрагментов изображений приведены в табл. 1, а решения о принятии гипотезы H_0 при уровне значимости $\alpha = 0,01$ приведены в табл. 2. В таблицах через $R1$ и $R2$ обозначены два портрета кисти Ф. Рокотова, M и F – мужской и женский портреты кисти двух других художников. В табл. 2 единица означает, что гипотеза об однородности принимается, а ноль – гипотеза отвергается.

Теоретико-информационная мера различия формируется на основе дивергенции Кульбака-Лейблера [14] в виде следующего выражения:

$$D_{KL} = \frac{1}{2} \left(\sum_{u \in H} p_U(u) \log \left(\frac{p_U(u)}{q_U(u)} \right) + \sum_{u \in H} q_U(u) \log \left(\frac{q_U(u)}{p_U(u)} \right) \right),$$

где $p_U(u)$ и $q_U(u)$ – вероятности того, что значения углов ориентации векторов на сравниваемых фрагментах принимают значение u ; H – алфавит U . Углы локальной ориентации вычисляются по компонентам структурного тензора только в областях высокого уровня когерентности.

Значения теоретико-информационной меры различия распределений направлений векторов, ортогональных векторам локальной ориентации текстуры, приведены в табл. 3. Данные, приведенные в таблице, показывают, что значения признака фактуры фрагмен-

Таблица 1: Значения статистики D для распределений угла ориентации хребтов

Картина	$R1$	$R2$	M	F
$R1$	0.	0.041	0.279	0.051
$R2$	0.041	0.	0.3	0.082
M	0.279	0.3	0.	0.237
F	0.051	0.082	0.237	0.

Таблица 2: Результат теста однородности распределений угла ориентации хребтов

Картина	$R1$	$R2$	M	F
$R1$	1	1	0	0
$R2$	1	1	0	0
M	0	0	1	0
F	0	0	0	1

Таблица 3: Значения меры различия D_{KL} распределений угла локальной ориентации текстуры

Картина	$R1$	$R2$	M	F
$R1$	0.	0.009	0.56	0.049
$R2$	0.009	0.	0.617	0.08
M	0.56	0.617	0.	0.4
F	0.049	0.08	0.4	0.

тов картин разных авторов различаются как минимум в 5 раз больше, чем значения признака на картинах одного автора.

Заключение

Предложено признаковое описание фрагментов картин на основе локальных пространственных и частотных характеристик изображений. Предложенные признаки на основе свойств хребтов полутонового рельефа изображения и элементов локального структурного тензора позволяют получить количественные характеристики фактуры картины, отражающей стиль живописи автора, а локальное волновое число позволяет оценить размеры кисти, использовавшейся художником. Используемые признаки обладают разделяющими свойствами. Вычисление признаков в отличие от известных подходов не требует предварительной сегментации отдельных мазков кисти и нечувствительно к вариациям условий получения изображений. Проведено тестирование предложенного признакового описания, которое показало его эффективность для сравнения фрагментов картин. Полученное описание фактуры позволит наряду с другими видами технико-технологических исследований сделать атрибуционное заключение. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение признакового описания фактуры, увеличение базы изображений картин, накопление экспериментальных данных и построение алгоритма формирования решения о схожести манеры живописи.

Литература

- [1] *Обухов Г. Г.* Краткий словарь терминов изобразительного искусства. М.: Советский художник, 1959.
- [2] *Рыбников А. А.* Фактура классической картины. М.: Государственная Третьяковская Галерея, 1927.
- [3] *Johnson C. R., Hendriks E., Berezhtoy I. J., Brevdo E., Hughes S. M., Daubechies I., Li J., Postma E., Wang J. Z.* Image processing for artist identification (Computerized analysis of Vincent van Gogh's painting brushstrokes) // Signal Processing Magazine, IEEE, 2008. Vol. 25, No. 4. Pp. 37–48.
- [4] *Polatkan G., Jafarpour S., Brasoveanu A., Hughes S., Daubechies I.* Detection of forgery in paintings using supervised learning // ICIP2009, IEEE, 2009. Pp. 2921–2924.
- [5] *Sablatnig R., Kammerer P., Zolda E.* Structural analysis of paintings based on brush strokes. // Proc. of SPIE Scientific Detection of Fakery in Art, SPIE. 1998. V. 3315. Pp. 87–98.
- [6] *Li J., Yao L., Hendriks E., Wang J. Z.* Rhythmic brushstrokes distinguish van Gogh from his contemporaries: Findings via automated brushstroke extraction // IEEE TPAMI. 2012. V. 34, No. 6. С. 1159–1176.
- [7] *Игнатова Н. С.* Анализ фактуры живописного произведения. // Основы экспертизы произведений масляной живописи. Методические рекомендации. Вып. 1. М.: Всероссийский художественный научно-реставрационный центр им. Академика И. Э. Грабаря, 1994. С. 15–26.
- [8] *Eberly D.* Ridges in image and data analysis. Dordrecht/Boston/ London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 213 pp.
- [9] *Jahne B.* Digital Image Processing. 6th ed. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 584 pp.
- [10] *Lindeberg T.* Scale-space theory in computer vision. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Dordrecht/Boston/ London: Kluwer Academic Publishers, 1994. 423 pp.
- [11] *Felsberg M., Sommer G.* The monogenic signal // IEEE Transactions on Signal Processing, 2001. Vol. 49, No. 12. Pp. 3136–3144.
- [12] *ван дер Варден Б. Л.* Математическая статистика. М.: Издательство иностранной литературы, 1960. 435 с.
- [13] *Лагутин М. Б.* Наглядная математическая статистика. М.: БИНОМ, 2011. 472 с.
- [14] *Escolano F., Suau P., Bonev B.* Information theory in computer vision and pattern recognition. London: Springer Verlag, 2009.