

# Метод локализации информативных областей на изображениях картин

Д.М. Мурашов<sup>1</sup>, Ф.Д. Мурашов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ ИУ РАН, ул. Вавилова, д. 44, кор. 2, Москва, Россия, 119333

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, Россия, 125993

**Аннотация.** Рассматривается задача локализации информативных областей на изображениях произведений живописи. Задача локализации информативных областей решается как задача сегментации текстурных изображений. Предлагается метод решения задачи на основе модифицированного суперпиксельного алгоритма сегментации. Вектор описания пикселей изображения расширен текстурными признаками, вычисляемыми по компонентам структурного тензора. Применение суперпиксельного алгоритма с расширенным признаковым описанием изображений позволяет учесть пространственные, цветовые и текстурные свойства сегментируемых областей изображений. Для обеспечения приемлемого качества сегментации используется условие минимума меры избыточности информации. Проведен вычислительный эксперимент на тестовых текстурных изображениях и изображениях картин. Результаты эксперимента показали эффективность предлагаемого метода.

## 1. Введение

Задачи локализации информативных областей на изображениях возникают, при компьютерном исследовании изображений фактуры картин для получения количественных характеристик манеры живописи художников [1]. Одна из составляющих фактуры – совокупность мазков кисти, формирующих ту или иную деталь картины. Особенности мазков кисти, обусловленные системой их наложения, выбором кистей и нажимом, отражают индивидуальность художника. Индивидуальность выявляется также в соотношении расположения мазков по границам формы и фона, а также по границам отдельных деталей [2]. На изображениях картин совокупность мазков образует текстуру. Поэтому в качестве количественных описаний фактуры картины, содержащей информацию о манере живописи автора, используются текстурные признаки [3]. Образцами для сравнения портретов являются группы мазков, формирующих детали лица. Такие группы мазков и являются информативными фрагментами изображений картин, которые необходимо выделить. Изображение мазка кисти представляет собой совокупность кривых, схожих по геометрическим характеристикам (длине, толщине, кривизне, направлению), различающихся по яркости и цвету. Группы мазков, образующие область интереса на изображении, могут быть охарактеризованы текстурными признаками. Тогда для локализации таких информативных областей могут применяться методы сегментации текстурных изображений. В этом случае задача локализации информативных областей может быть сформулирована следующим образом. Требуется выделить на изображении область с текстурой определенного вида.

Для сегментации текстурных изображений применяются методы на основе матрицы совместной встречаемости и признаках Харалика [4], энергетических текстурных характеристиках Лавса [5], фильтров Габора [6], автокорреляции, марковских случайных полей и ряда других. Указанные методы во многих случаях достаточно эффективны. Однако для сегментации текстур с большим диапазоном пространственных частот потребуется формировать несколько матриц совместной встречаемости для разных геометрических соотношений между пикселями. Для сегментации изображений с разнонаправленными текстурами необходимо применять соответствующее количество фильтров Габора. Признаки Лавса требуют больших вычислительных затрат и не всегда обеспечивают необходимой точности локализации объектов.

В данной работе для решения задачи поиска информативных фрагментов на изображениях картин с учетом текстурных, пространственных и цветовых характеристик изображения предлагается модифицировать суперпиксельный алгоритм сегментации [7] за счет расширения вектора описания пикселей изображения. В качестве текстурных признаков будут использоваться мера когерентности и доминирующее направление текстуры, вычисляемые по компонентам структурного тензора [8]. Для выбора параметра процедуры постобработки будет использоваться условие минимума меры избыточности информации, предложенный в работе [9].

## 2. Метод локализации информативных областей на базе суперпиксельного алгоритма

Для поиска информативных областей на изображениях предлагается метод, основанный на модификации суперпиксельного алгоритма SLIC [7]. В следующем подразделе дается краткое описание базового суперпиксельного алгоритма.

### 2.1. Алгоритм сегментации SLIC

Основная идея алгоритма сегментации SLIC заключается в кластеризации пикселей в ограниченных областях, на которые регулярным образом разбивается анализируемое изображение.

Каждая точка изображения характеризуется пятимерным вектором  $\mathbf{v}_i$ , где

$x, y$  - координаты точки в выбранном цветовом пространстве,  $z$  - пространственные координаты точки изображения. Авторы метода использовали цветовое пространство CIE Lab. Алгоритм включает следующие шаги.

1. Изображение разбивается на  $N$  фрагментов размера  $l \times l$ , которые задают начальное приближение кластеров-суперпикселей. В качестве начальных центров суперпиксельных фрагментов выбираются их геометрические центры  $\mathbf{c}_i$ .
2. Корректируются координаты центров фрагментов из условия минимального значения цветового градиента в окрестности геометрического центра.
3. Формирование локальных кластеров в окрестности центров аналогично методу  $k$ -средних. Расстояние  $d_{ij}$  между центром и точками фрагмента вычисляется как комбинация евклидовых расстояний по цветовой и пространственной составляющим описания точки  $\mathbf{p}_i$ :

(1)

(2)

(3)

где  $\alpha$  - параметр, задающий соотношение вкладов двух составляющих описания изображения в величину расстояния  $r_{ij}$ ;  $i$  и  $j$  - номера точек, между которыми вычисляется расстояние.

4. Определение новых центров кластеров и вычисление смещений центров.
5. Повтор шагов 3 и 4 до тех пор, пока смещение центров между итерациями не будет превышать заданного значения.

## 2.2. Расширенное описание пикселей изображения

Для учета текстуры изображения при поиске области интереса предлагается расширить описание пикселя изображения текстурными признаками, получаемыми по элементам структурного тензора. Этими признаками являются локальная ориентация простых окрестностей и мера когерентности [8].

Структурный тензор определяется как матрица вторых моментов в точке  $(x, y)$ , взвешенная оконной функцией:

где  $w(x, y)$  - оконная гауссова функция [10],  $\theta(x, y)$  - функция, описывающая полутоновой рельеф исследуемого изображения. Угол локальной ориентации структурного тензора  $\theta(x, y)$  вычисляется по формуле:

(4)

где  $T_{xx}, T_{yy}, T_{xy}$  - компоненты структурного тензора.

Локальная мера когерентности градиентов изображения вычисляется по формуле [8]:

(5)

где  $\lambda_1, \lambda_2$  - собственные значения матрицы вторых моментов  $T$  в точке  $(x, y)$ . С учетом характеристик текстуры (4, 5) расширенный вектор описания точки изображения формируется в виде:

(6)

Для вычисления расстояния в расширенном пространстве (6) в формулу (3) вводятся текстурные составляющие (4) и (5):

(7)

В формуле (7) нормирующие множители компонент расстояния учтены в весовых коэффициентах  $w_1, w_2$ . Степень важности той или иной составляющей изображения определяется соответствующим выбором весовых коэффициентов. С целью объединения

полученных суперпикселей в однородные области, соответствующие объектам исходного изображения, как и в работе [9] применяется процедура постобработки. Целью постобработки является объединение полученных суперпикселей в однородные области, соответствующие объектам исходного изображения. Для принятия решения об объединении используется пороговое решающее правило, разрешающее объединение, если выполняется условие

(8)

где  $r_{ij}$  - расстояние между центрами соседних суперпикселей с номерами  $i$  и  $j$  в выбранном признаковом пространстве;  $T$  - пороговое значение,  $\alpha$  - параметр;  $f$  - функция, нелинейная в общем случае. Пусть порог вычисляется как

Для достижения приемлемого качества сегментации изображений применяется теоретико-информационный подход, предложенный в работе [9]. В качестве критерия качества сегментации изображений предложено использовать меру избыточности информации.

### 3. Вычислительный эксперимент

Эффективность предлагаемого метода демонстрируется вычислительным экспериментом, состоящим из трех этапов. На первом этапе используется синтетическое изображение с текстурными областями. На втором этапе модифицированный алгоритм SLIC (далее будем использовать обозначение SLIC<sub>m</sub>) тестируется на изображении мозаики текстур Южнокалифорнийского университета [11]. На третьем этапе предложенный алгоритм применялся к изображениям картин.

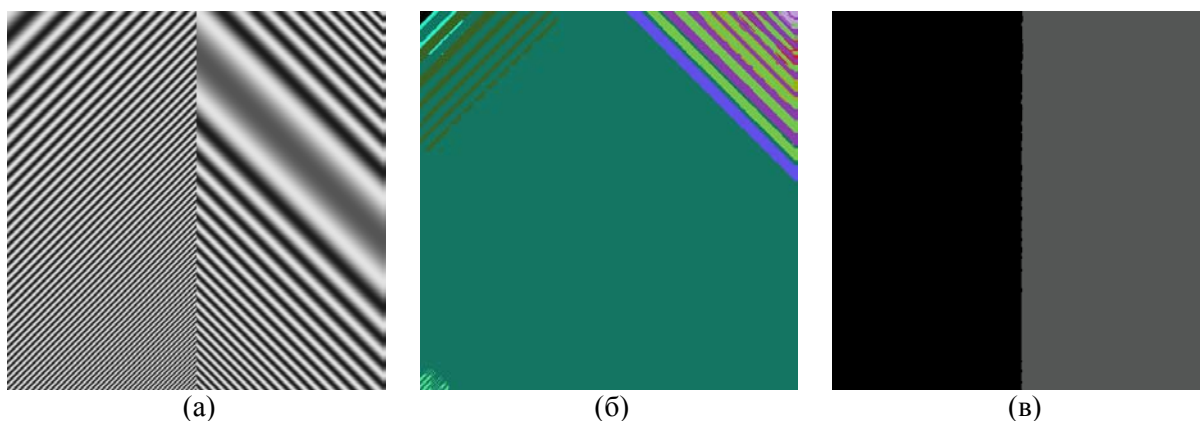
#### 3.1. Сегментация тестового текстурного изображения

В первой части вычислительного эксперимента проверялась эффективность модифицированного суперпиксельного алгоритма сегментации SLIC<sub>m</sub> на тестовом изображении, представленном на рис. 1(а). Изображение содержит два вида периодической текстуры с переменным волновым числом и направлениями 45 и 135 градусов. На рис. 1(б) показан результат сегментации изображения с учетом только цветовой и пространственной составляющих описания пикселей, из которого видно, что не удается точно выделить области с разной текстурой. Были заданы следующие значения параметров: размер оконной функции

пикселей,  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.5$ ,  $\gamma = 0.5$ .

Значение параметра  $\alpha$  выбрано достаточно малым, чтобы обеспечить наибольшую точность сегментации. В данном случае выбранное значение  $\alpha$  позволяет получить топологически простые сегменты, так как внутри областей изображения яркость меняется плавно, нет больших элементов текстуры с постоянным уровнем яркости. Весовые коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$  выбраны, принимая во внимание характеристики текстурных областей. Основными характеристиками являются ориентация текстуры и когерентность, поэтому наибольшее значение имеют коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$  (см. формулу (7)). Цвет в данном случае не является характеристикой областей интереса, и мы выбираем достаточно малое значение

Для обеспечения связности областей коэффициент  $\alpha$  выбираются ненулевым. Окончательная настройка коэффициентов производится экспериментально. Учет текстурных признаков позволил выделить разные текстурные области с точностью определения границ в пределах 2 пикселей (см. рисунок 1(в)).



**Рисунок 1.** Результат сегментации синтетического изображения: (а) тестовое изображение; (б) результат сегментации с учетом только цветовой и пространственной составляющих описания пикселей; (в) результат сегментации при размере оконной функции пикселей и значениях параметров  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.5$ ,  $\gamma = 0.5$ ,  $\delta = 0.5$ .

### 3.2. Сегментация изображения мозаики текстур

В эксперименте была использована мозаика текстурных изображений, составленная в Южнокалифорнийском университете, Лос-Анджелес (University of Southern California), на основе изображений из альбома фотографий текстур П. Бродаца [12], см. рис. 2(а). Проведено сравнение результатов сегментации, полученных предлагаемым методом на основе алгоритма SLIC с расширенным описанием пикселей и методом на основе текстурных характеристик Лавса [13]. Метод характеристик Лавса заключается в следующем. Входное изображение обрабатывается комбинациями фильтров с масками в виде пятимерных векторов. По отфильтрованным изображениям строятся карты энергии. Каждой точке карты соответствует значение энергии, вычисленное суммированием абсолютных значений пикселей отфильтрованного изображения в окне заданного размера. На основе данных из полученных энергетических карт методом кластеризации  $k$ -средних выделены области, соответствующие элементам мозаики. В эксперименте использовалось окно размером  $15 \times 15$  пикселей для вычисления энергетических характеристик, и задано желаемое число кластеров  $k = 6$  в алгоритме кластеризации. Значения параметров подобраны для обеспечения наилучшей точности сегментации шести областей интереса.

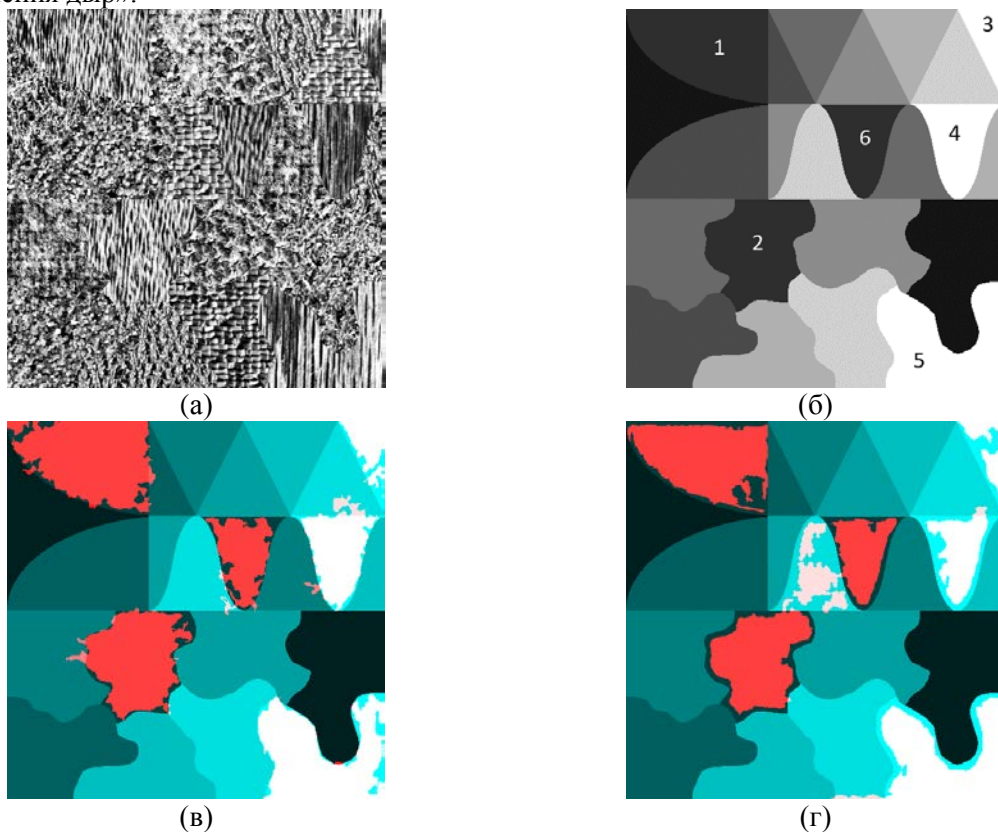
На рис. 2(б) показана карта текстур мозаики. На рис. 2(в) показан результат сегментации мозаики, выполненной с помощью предлагаемого алгоритма, совмещенный с картой текстур. В данном эксперименте были заданы следующие значения параметров: размер оконной функции

пикселей,  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.5$ ,  $\gamma = 0.5$ ,  $\delta = 0.5$ . Параметр  $\lambda$  выбран,

исходя из размера элементов текстуры в областях интереса. Весовые коэффициенты выбраны, принимая во внимание характеристики текстурных областей. Основной характеристикой является ориентация текстуры, поэтому наибольшее значение имеет коэффициент  $\alpha$  (см. формулу (7)). Цвет в данном случае не является характеристикой областей интереса, и мы полагаем  $\beta = 0$ . Для обеспечения связности областей и учета

когерентности текстуры коэффициенты  $\gamma$  и  $\delta$  выбираются ненулевыми. Окончательная настройка коэффициентов производилась в ходе эксперимента. Параметр  $\lambda$  выбран, исходя из условия минимума критерия избыточности [9]. На рис. 2(в) видно, что выделены области с большими значениями меры когерентности и однородной ориентацией текстуры. На рисунке красным и белым цветом выделены сегментированные области, розовым

- области пересегментации. Области недосегментации обусловлены отсутствием градиента в соответствующих пикселях исходного изображения. На рис. 2(г) показан результат сегментации мозаики методом энергетических характеристик Лавса. В обоих случаях сегментированные области показаны после применения морфологической операции «заполнения дыр».



**Рисунок 2.** Результат сегментации мозаики текстур USC: (а) изображение мозаики текстур; (б) карта текстур; (в) результат сегментации алгоритмом SLICm, наложенный на карту текстур, при размере оконной функции  $W = 15$  пикселей и значениях параметров  $m = 10$ ,  $s = 10$ ; (г) результат сегментации методом энергетических характеристик Лавса. Красным и белым цветом выделены сегментированные области, розовым - области пересегментации.

Для количественного сравнения результатов сегментации, показанных на рис. 2(в, г) использованы показатель перекрытия (overlap) областей  $O$  и двух сегментированных изображений:

который применяется для оценки точности сегментации (см., например, [14]). Области, полученные каждым из методов, сравнивались с соответствующей областью  $O_i$  на карте текстур (рис. 3(б)). Значения показателя перекрытия, вычисленные для шести областей мозаики, представлены в Таблице 1. Из данных, представленных в Таблице 1, следует, что предлагаемый метод на основе алгоритма SLIC с расширенным описанием пикселей изображения превосходит метод на основе энергетических характеристик Лавса на всех шести рассматриваемых областях мозаики текстур. В данном эксперименте неоптимизированной программной реализацией алгоритма SLICm при сегментации изображения текстурной

мозаики затрачено 2.49 секунды, а реализацией метода энергетических характеристик Лавса затрачено 32.6 секунды.

**Таблица 1.** Значения показателя перекрытия для шести областей мозаики, полученных двумя алгоритмами сегментации.

Область		
1	0.662	0.873
2	0.719	0.81
3	0.613	0.68
4	0.618	0.776
5	0.773	0.83
6	0.474	0.675

### 3.3. Сегментация информативных областей на изображениях картин

При компьютерном анализе манеры живописи художников возникает необходимость выделения фрагмента изображения картины, содержащего однородную группу мазков. Такая группа характеризуется одинаковым направлением движения кисти и цветом. Применение суперпиксельного алгоритма сегментации с расширенным описанием точек изображения SLICm соответствует решаемой задаче. В этом случае большая величина меры когерентности (5) будет показывать наличие мазков, а величина ориентации простых окрестностей (4) будет характеризовать их направление. Кроме того, однонаправленные мазки будут группироваться по цвету. В эксперименте использовались изображения портретов, написанных разными художниками 16-19 веков.

Результаты продемонстрированы на примере картины «Портрет Цецилии Ренаты» (Питер Данкертс де Рей) из собрания ГИМ ( см. рис. 3(а)). Маски трех наиболее крупных областей интереса, полученных при значениях параметров алгоритма  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $\theta$  , показаны на рис. 3(б). Выделенные области объединяют точки изображения с одинаковым направлением текстуры. Маски получены применением операций морфологического закрытия со структурирующим элементом размером 5 пикселей, заполнения дыр и морфологического открытия. Значения параметров алгоритма SLICm выбирались, как и на предыдущих этапах эксперимента, с учетом свойств анализируемого класса изображений, и далее корректировались для получения наилучшего результата. Значение параметра  $\lambda$  (см. неравенство (8)), соответствующее числу сегментов сегментированного изображения  $K$  , выбрано из условия минимума критерия согласно методики, предложенной в работе [9].

## 4. Выводы

Рассмотрена задача локализации информативных областей с текстурой, характерной, в частности, для групп мазков на изображениях произведений живописи. Предложено решать задачу локализации информативных областей с помощью метода сегментации текстурных изображений. Разработан метод локализации информативных областей, основанный на модификации суперпиксельного алгоритма сегментации за счет расширения вектора описания пикселей изображения текстурными признаками. В качестве текстурных признаков, характеризующих группы мазков кисти, выбраны мера когерентности и угол ориентации простых окрестностей, вычисляемые по компонентам структурного тензора. Для выбора параметра процедуры постобработки применялся теоретико-информационный критерий качества сегментации. Эффективность предложенного метода локализации информативных областей продемонстрирована на тестовых изображениях. Проведено сравнение результатов

сегментации изображения текстурной мозаики предложенным методом и известным методом на основе энергетических признаков Лавса. Сравнение показало превосходство предложенного метода как по точности сегментации, так и по временным затратам. Разработанный метод был применен для локализации информативных областей на изображениях произведений живописи. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение возможности применения альтернативных текстурных признаков для поиска специфических областей интереса.



**Рисунок 3.** Результат работы алгоритма сегментации: (а) – изображение лица с портрета из собрания ГИМ ; (б) - маски крупных выделенных областей интереса после обработки.

## 5. Благодарности

Работавыполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты №15-07-09324 и №15-07-07516.

## 6. Литература

- [1] Stork, D. Computer Vision and Computer Graphics Analysis of Paintings and Drawings: An Introduction to the Literature / D. Stork // Computer Analysis of Images and Patterns: 13th International Conference, CAIP 2009, Proceedings. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. – P. 9-24.
- [2] Ignatova, N.S. Analysis of oil painting textures / N. S. Ignatova // Fundamentals of Oil painting Examination. The guidelines. – Moscow: I.E. Grabar' restoration Centre, 1994. – Vol. 1. – P. 15–26. (in Russian).
- [3] Murashov, D.M. Application of Texture Features for Comparing the Fracture of Paintings / D.M. Murashov // Pattern Recognition and Image Analysis. – Pleiades Publishing, Ltd., 2016. – Vol. 26(4). – P. 800-809.
- [4] Haralick, R.M. Textural Features for Image Classification / R.M. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – 1973. – Vol. 3(6). – P. 610–621. DOI: 10.1109/TSMC.1973.4309314.
- [5] Laws, K. Textured Image Segmentation, Ph.D. Thesis. Los Angeles: University of Southern California, 1980.
- [6] Manduchi, R. Efficient Deformable Filter Banks / R. Manduchi, P. Perona, D. Shy // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1998. – Vol. 46(4). – P. 1168–1173.
- [7] Achanta, R. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods / R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua, S. Susstrunk // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol.34(11). – P. 2274–2282.
- [8] Jahne, B. Digital Image Processing, 6th ed. Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 584 p.



- [9] Murashov, D.M. Application of information-theoretical approach for image segmentation / D.M. Murashov // *Machine Learning and Data Analysis*. – 2016. – Vol. 2(2). – P. 231–243. DOI:10.21469/22233792.2.2.08.
- [10] Lindeberg, T. *Scale-space Theory in Computer Vision*. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science / T. Lindeberg – Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1993. – 423 p.
- [11] Weber, A. *The USC Texture Mosaic Images* / A. Weber - USC-SIPI, 2004.
- [12] Brodatz, P. *Textures: A Photographic Album for Artists and Designers* / P. Brodatz - Dover Publications, 1966.
- [13] Shapiro, L. *Computer vision* / L. Shapiro, G.C. Stockman -Prentice Hall, 2001. – 364 p.
- [14] Arbelaez, P. Contour Detection and Hierarchical Image Segmentation / P. Arbelaez, M. Maire, C. Fowlkes, J. Malik // *IEEE TPAMI*. – 2011. – Vol. 33(5). – P. 898-916.

# Method for Localizing Informative Regions in Images of Paintings

D.M. Murashov<sup>1</sup>, F.D. Murashov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FRC CSC RAS, Vavilov str., 44-2, Moscow, Russia, 119333

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe shosse, 4, Moscow, Russia, 125993

**Abstract.** A problem for localizing informative regions in digital images of fine art paintings is considered. In this paper, the task of localization of informative areas will be addressed as a problem of segmentation of texture images. A method for solving the problem based on modified super-pixel segmentation algorithm with post-processing procedure is proposed. Vector of image pixel description is expanded by texture features computed using components of structure tensor. Application of superpixel algorithm with extended feature description of images will make it possible to take into account spatial, color, and textural properties of image regions. To obtain an acceptable quality of segmentation, condition of minimum information redundancy measure is used. A computational experiment is carried out on textural test images. The developed technique is used to localize informative areas in the images of paintings. The results of the experiment show the efficiency of the proposed method.

**Keywords:** texture of pictures, Textural features, segmentation, structural tensor.