Определение количества нитей холстов картин по изображениям, полученным при направленном освещении^{*}

Д. М. Мурашов¹, А. В. Березин², Е. Ю. Иванова³

d_murashov@mail.ru; berezin_aleks@mail.ru; ivanova-e-u@yandex.ru ¹ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия; ²ГИМ, Москва, Россия; ³РАЖВиЗ Ильи Глазунова, Москва, Россия

Работа посвящена решению задачи подсчета количества нитей на изображениях холстов картин, что необходимо для определения характеристик, используемых искусствоведами для датировки произведений живописи. Особенностью исследования является использование изображений, полученных фотосъемкой при направленном под острым углом по отношению к холсту освещении. Для анализа изображений образцов использовались предложенные модификации известного алгоритма, основанного на частотной фильтрации и пороговой бинаризации, и новый алгоритм на основе локализации хребтов полутоновых изображений. Проведен вычислительный эксперимент по исследованию холстов картин русских художников XVIII века. Вычислительный эксперимент показал, что предложенные алгоритмы обеспечивают измерение плотности холста с точностью в пределах одной нити на сантиметр на 70 – 97 процентах изображений образцов. Полученные результаты соответствуют результатам известных алгоритмов измерения плотности холста по рентгеновским изображениям картин.

Ключевые слова: холст картины; нить холста; плотность холста; анализ изображений; преобразование Фурье; хребты полутоновых изображений; математическая морфология

DOI: 10.21469/22233792.4.2.05

1 Введение

Одним из видов послойного исследования произведений живописи в атрибуции является определение производителя и датировка производства материала основы, в частности холста. Одним из признаков может быть штамп производителя [1]. Однако штампы на холстах картин встречаются крайне редко, например, в собрании ГИМ имеется лишь несколько таких картин.

Работ, посвященных характеристикам тканых основ живописи достаточно мало. Известно несколько работ, например, [2–5], где приводятся экспериментальные данные по исследованию свойств холстов, применявшихся художниками разных стран в разные периоды времени. В работах [2,3] указаны основные характеристики холстов, которые используются в атрибуции картин [3,6]. К ним относятся максимальная плотность ткани по направлениям основы и утка, фактическая плотность, а также зернистость холста. Для вычисления этих характеристик необходимо измерить диаметры нитей основы и утка, подсчитать количество нитей по двум направлениям и количество переплетений на единицу площади. В данной работе будет рассматриваться задача подсчета количества нитей в определенном направлении.

^{*}Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект №18-07-01385.

Обычно для определения плотности ткани по направлениям основы и утка эксперты выполняют подсчет количества нитей вручную. Эта операция достаточно трудоемка и сопровождается ошибками [7], особенно если нити достаточно тонкие. Указанное обстоятельство стимулировало разработку автоматизированных алгоритмов и процедур подсчета количества нитей холстов по изображениям. В последние несколько лет были разработаны автоматизированные алгоритмы вычисления характеристик холстов по рентгеновским (см. работы [8,9] и ряд других работ этих авторов) и высококачественным терагерцовым [10] изображениям. На рентгеновских снимках сами нити холста не видны, так как не имеют заметного поглощения рентгеновского излучения. На снимках виден «отпечаток» холста в грунте, а соответствующий нитям рельеф грунта хорошо просматривается из-за достаточно заметного поглощения излучения материалом грунта [5].

В рабтах [11–13] предложена математическая модель переплетений нитей и разработан следующий полуавтоматический алгоритм определения плотности нитей на рентгеновских снимках холста: (1) выделение вертикальной (или горизонтальной линии на изображении холста; (2) вычислить дискретное преобразование Фурье функции яркости вдоль выбранной линии; (3) определить пространственную частоту, соответствующую подходящему пику Фурье-образа; (4) по значению пространственной частоты вычислить плотность нитей по выбранному направлению. Анализировались отсканированные с разрешением 600 dpi рентгеновские снимки картин Ван Гога. Для улучшения изображения используется процедура, разработанная в работе [14]. На рентгеновских снимках картин Ван Гога алгоритм показал точность в пределах нити/см на 84% исследуемых изображений и в пределах нить/см на 95% изображений. Однако, если в качестве грунта при создании картины использовались свинцовые белила, то рентгеновские снимки не дают требуемой информации для анализа. В этом случае необходимо использовать изображения, полученные в видимом диапазоне спектра.

Однако, если в качестве грунта при создании картины использовались свинцовые белила, то рентгеновские снимки не дают требуемой информации для анализа. В этом случае необходимо использовать изображения, полученные в видимом диапазоне спектра.

Для контроля плотности ткани в текстильном производстве разработан ряд алгоритмов на базе методов анализа изображений. В качестве входных данных используются фотографии, полученные при просвечивании участка ткани источником света [15]. Изображение фиксируется ССД камерой с матрицей 2Мп, установленной на микроскопе. Исследуются образцы ткани размером около $1, 2 \times 1, 2$ см. Полученные при увеличении $10 \times$ изображения имеют размер 512 × 384 пикселей. Для подсчета количества нитей по основе и утку предложен следующий алгоритм: (1) изображение образца ткани фильтруется в Фурье-области фильтром с маской в виде полосы шириной 3 пикселя вдоль соответствующей выбранному направлению оси координат; (2) отфильтрованное изображение бинаризуется адаптивным алгоритмом Ниблака (Niblack) [16] с окном 32×32 пикселя; (3) выполняется подсчет количества нитей вдоль базовой линии и вычисляется плотность ткани. Ошибка, полученная в эксперименте с 15 образцами трех видов ткани с различной плотностью, не превосходит одного процента. В работе [17] представлен метод определения плотности ткани на основе применения фильтров Габора для подсчета количества нитей по направлениям основы и утка. Метод позволяет определить плотность ткани с точностью порядка 90%.

В данной работе решалась задача разработки эффективных автоматических инструментальных средств для определения плотности холста произведений живописи русских художников второй половины XVIII века по изображениям, полученным с помощью цифровой камеры в видимом спектральном диапазоне. Отличительной особенностью предлагаемых процедур является использование в качестве входных данных изображений, полученных съемкой в боковом свете, а также определение плотности по гистограммам измерений количества нитей, выполняемых по каждой строке/столбцу матрицы обработанного изображения. Съемка в боковом свете широко применяется в технико-технологических исследованиях красочного слоя и позволяет выявить особенности фактуры картины. В описываемом исследовании съемка при направленном под острым углом освещении подчеркивает текстуру холста в выбранном направлении, а применение гистограмм позволяет снизить влияние на результат артефактов, полученных при обработке изображений.

2 Исходные данные

При исследовании основы картин Ван Гога анализировались рентгеновские изображения, на которых проявляются просветы между нитями, что позволяет выявить области переплетения нитей. При контроле качества ткани образцы просвечиваются источником света, что также позволяет получить изображение, позволяющее анализировать структуру ткани. В предлагаемом исследовании в качестве исходных данных предлагается использовать изображения холста, полученные фотосъемкой в направленном свете, что позволит подчеркнуть нити с требуемой пространственной ориентацией.

Съемка производилась при положении осветительного прибора, обеспечивающем падение света в диапазоне углов 10 - 30 градусов относительно плоскости картины снизу, сверху, слева и справа. Изображение холста XVIII века размером 6000×4000 пикселей, полученное при освещении сверху, показано на рис. 1(а), фрагмент изображения показан на рис. 1(б). Изображения холстов картин зафиксированы цифровой фотокамерой NIKON D 7100 с матрицей 24 Мп и объективом NIKON AF-S Micro NIKKOR 40mm 1 : 2, 8 G. При съемке применялись осветительные приборы LOWEL TOTA-LIGHT T1 – 10 с галогенной лампой EMF Q800T34 MIH 800W 240V R7s (цветовая температура - 32000 K). Съемка производилась с расстояния, приблизительно равного 25 см.



Рис. 1 Изображение фрагмента холста XVIII века, полученное при освещении, направленном сверху: (a) фрагмент размером 6000 × 4000 пикселей, в верхней части изображения видна тень от подрамника; (б) увеличенный участок изображения (a).

Особенности изображений холста картин обусловлены уровнем развития текстильного производства во время создания картины, особенностями технологии подготовки основы картины, в частности, натяжки холста на подрамник и нанесения грунта, степенью сохранности. Следует отметить следующие основные факторы: нити различной толщины на одном образце, вариации толщины одной нити, наличие загрязнений, проникновение грунта, непараллельность нитей деталям подрамника. Неравномерное натяжение холста создает значительное искривление нитей и существенную неравномерность промежутков между нитями (см. рис. 1). Возможны повреждения холста (см. рис. 1(б)). Различные конструкции подрамников (в частности, наличие или отсутствие перекладин) и применяемая технология съемки обусловливают отклонения характеристик фиксируемых изображений. Указанные обстоятельства затрудняют применение методов измерения плотности, созданных для контроля качества фабричной продукции [15, 17], так как перечисленные особенности холстов картин порождают артефакты на обработанных изображениях, по которым производится подсчет количества нитей. Поэтому возникает необходимость разработки автоматических алгоритмов, позволяющих определять количество нитей холстов картин с приемлемой точностью. В следующем разделе предлагаются три алгоритма подсчета количества нитей в образцах холстов картин.

3 Алгоритмы подсчета количества нитей

В данном разделе для подсчета количества нитей в образцах холста предлагается две модификации алгоритма, разработанного в работе [15], на базе частотных методов и новый алгоритм, основанный на локализации хребтов полутонового изображения. Предлагаемые алгоритмы построены в предположении, что изображение холста имеет периодическую текстуру в направлениях основы и утка. Основная идея указанных алгоритмов заключается в том, чтобы подчеркнуть на изображении образца нити, расположенные в определенном направлении, сегментировать нити и подсчитать количество сегментированных объектов.

В работе [18] предложена математическая модель рентгеновского изображения холста, включающая две составляющие: периодическую, описывающую структуру холста, и составляющую, описывающую другие видимые в рентгеновских лучах слои картины (красочный слой, подрамник). В случае фотографий в направленном свете будем использовать аналогичную модель:

$$I(\boldsymbol{x}) = I_0 + a \sin\left(2\pi \boldsymbol{k}^T \boldsymbol{x} - \varphi\right) + n(\boldsymbol{x}), \qquad (1)$$

где $I(\mathbf{x})$ - значение уровня серого тона в точке \mathbf{x} изображения с координатами (x, y), I_0 - смещение уровня серого тона, a - амплитуда изменения уровня серого, $\mathbf{k} = (k_1, k_2)^T$ - вектор волновых чисел, φ - фаза, $n(\mathbf{x})$ - периодическая функция, моделирующая переплетения нитей. Далее будем проводить анализ на примере изображений, полученных при верхнем или нижнем освещении, направленном под острым углом к холсту. При подсчете количества нитей необходимо выполнить операции, минимизирующие составляющую $n(\mathbf{x})$ модели (1). Изображение холста при направленном освещении сверху или снизу, полученное в соответствии с моделью (1) при $k_1 = 0$, $k_2 = 0.08$ и n = 0, показано на рис. 2.

Далее будут представлены методы, позволяющие уменьшить составляющую n(x) модели (1) и позволяющие автоматически подсчитать количество нитей в образце.

3.1 Алгоритмы на основе частотной фильтрации

Для анализа будем использовать прямоугольные фрагменты полутоновых изображений холста. Так же как и в работе [15] алгоритм состоит из этапов сегментации нитей и



Рис. 2 Модель изображения холста при направленном освещении; имитируется подчеркивание горизонтальных нитей.

подсчета их количества. На изображении холста (см. рис. 1) видна периодическая текстура, которую можно приближенно описать моделью (1). Поэтому представляется целесообразным использовать для обработки частотные методы. Как и в работе [15] для выделения нитей с нужной ориентацией и диапазоном пространственных частот будет применена фильтрация в частотной области:

$$I_F(\boldsymbol{x}) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \left\{ I(\boldsymbol{x}) \right\} I_M(\boldsymbol{x}) \right\}, \qquad (2)$$

где $I_F(\mathbf{x})$ - отфильтрованное изображение, \mathfrak{F} и \mathfrak{F}^{-1} - прямое и обратное преобразование Фурье, $I_M(\mathbf{x})$ - маска фильтра. Перед фильтрацией выполняется операция расширения динамического диапазона входного изображения. Результат фильтрации изображения образца холста картины (см. рис. 3(а)) показан на рис. 3(б). Маска фильтра показана на рис. 3(в). Размер маски (H/2 + 1) × 3 пикселя, где H - высота изображения образца. Маска размыта фильтром Гаусса с небольшим значением σ . Далее на отфильтрованном изображении необходимо выделить нити. Для этого результат фильтрации бинаризуется. Для бинаризации применялись два алгоритма: глобальный алгоритм Отсу [19] и локальный алгоритм Ниблака [16]:

$$T_N = m + k_N \sigma_N,\tag{3}$$

где T_N - значение порога; m и σ_N - среднее значение серого тона и среднеквадратическое отклонение, вычисленные в скользящем окне; k_N - коэффициент.

С целью удаления мелких объектов, образующихся при бинаризации и способных исказить результат подсчета нитей, выполняется морфологическая операция эрозии с квадратным структурирующим элементом размером 3×3 . На рис. $3(\Gamma)$ показано изображение горизонтальных нитей, бинаризованное методом Отсу и очищенное операцией эрозии. На рис. 3(д) представлено бинарное изображение нитей, полученное после применения адаптивного алгоритма Ниблака (3) с размером окна 30×30 и коэффициентом $k_N = 0.25$ и операции эрозии.

На следующем этапе необходимо подсчитать количество объектов, соответствующих нитям, на сегментированных изображениях. В работе [15] подсчет количества нитей выполняется вдоль заданной базовой линии. В данной работе предлагается выполнять подсчет нитей по всем столбцам матрицы изображения и строить гистограмму. Число нитей будет определяться по максиму полученной гистограммы. Каждый объект характеризуется наличием перепадов яркости 0 – 255 и 255 – 0 (за исключением объектов, включающих пиксели в первой и последней строке матрицы изображения. Если при сканировании столбца матрицы встречается указанная комбинация перепадов яркости, то число объектов в столбце увеличивается на единицу. На рис. 3(е, ж) показаны гистограммы результатов подсчета количества нитей в образце по сегментированным изображениям, представленным на рис. 3(г, д), соответственно.



Рис. 3 Иллюстрация работы модификаций алгоритма [15] на основе частотной фильтрации: (а) полутоновое изображение образца холста; (б) результат частотной фильтрации изображения образца; (в) маска фильтра; (г) результат применения метода пороговой бинаризации Отсу и операции эрозии к отфильтрованному изображению; (д) результат применения метода адаптивной пороговой бинаризации Ниблака и операции эрозии к отфильтрованному изображению; (е) и (ж) - гистограммы подсчитанных бинарных объектов на изображениях (г) и (д), соответственно.

Операция эрозии крайне важна в описанных выше алгоритмах, так как после пороговой бинаризации появляется много артефактов, которые вносят существенные искажения в результат подсчета нитей. Например, при подсчете нитей непосредственно после бинаризации методом Отсу изображения, показанного на рис. 3(б), найдена 61 нить, а после применения операции эрозии – 50. Аналогично, после бинаризации методом Ниблака найдено 67 нитей, а после операции эрозии – 51 нить. При бинаризации локальным методом Ниблака проявляется ряд переплетений нитей (см. рис. 3(д)), частично видимый в нижней части рис. 3(а), и частично горизонтальная нить. Это является причиной расхождений результатов представленных модификаций алгоритма [15]. Описанные выше

127

алгоритмы достаточно эффективны и быстры. Алгоритм с глобальной бинаризацией по методу Отсу не требует настройки параметров. Алгоритм с локальной бинаризацией по методу Ниблака требует задания двух параметров. Однако на некоторых изображениях бинаризация выполняется некорректно, что приводит к отказам при подсчете количества нитей. В следующем разделе представлен альтернативный алгоритм подсчета нитей в образцах холстов картин на основе анализа хребтов полутонового изображения, который не требует пороговой бинаризации.

3.2 Алгоритм на основе локализации хребтов полутонового изображения

Пусть в модели (1) $I \in C^2(\mathbb{R}^2, \mathbb{R})$. Тогда нити могут быть представлены хребтами объектов на полутоновых изображениях образцов. Хребты локализуются на основе метода, описанного в [20]. Множество точек, образующих хребет объекта полутонового изображения, дополнено параболическими и омбилическими точками поверхности, аппроксимирующей рельеф изображения.

Предполагается, что градиент $DI \neq 0$, $DI = (I_x, I_y)^{\mathsf{T}}$. Введем обозначения N = DI / |DI|, $T = DI^{\perp} / |DI|$, $DI^{\perp} = (-I_x, I_y)^{\mathsf{T}}$, где N и T – нормальный и касательный векторы к линиям уровня (изофотам) I. Имеет место следующее выражение на основе матрицы Гессе D^2I функци I(x, y) [20]:

$$-\frac{1}{|\mathbf{D}I|} \left[\begin{array}{cc} \mathbf{N}^{\mathsf{T}} \mathbf{D}^{2} \mathbf{I} \mathbf{N} & \mathbf{N}^{\mathsf{T}} \mathbf{D}^{2} \mathbf{I} \mathbf{T} \\ \mathbf{T}^{\mathsf{T}} \mathbf{D}^{2} \mathbf{I} \mathbf{N} & \mathbf{T}^{\mathsf{T}} \mathbf{D}^{2} \mathbf{I} \mathbf{T} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} g & \mu \\ \mu & k \end{array} \right],$$

где $k = -T^{\intercal} (D^2 I / |DI|) T$ – кривизна изофоты, а $\mu = -T^{\intercal} (D^2 I / |DI|) N$ – кривизна линий потока яркости; $g = -N^{\intercal} (D^2 I / |DI|) N$ – мера изменения величины градиента вдоль линий потока. Точки, образующие хребты I удовлетворяют условиям:

$$\mu = 0; \tag{4}$$

$$k > \max\left(0, g\right). \tag{5}$$

При обнаружении хребтов на реальных изображениях холста требуется предварительная обработка, включающая следующие операции: (1) расширение динамического диапазона изображения; (2) коррекция неравномерной освещенности; (3) низкочастотная гауссова фильтрация.

Коррекция неравномерной освещенности выполняется алгоритмом, описанным в [21] на основе операции морфологического закрытия. Размер структурирующего элемента выбран равным 11 пикселей для исследуемого класса изображений. Для сглаживания шумов на скорректированном изображении применяется гауссово размытие с $\sigma = 7$. Далее на изображении находятся точки, удовлетворяющие условиям (4), (5). Найденные точки образуют хребты изображения. Для выделения фрагментов хребтов, соответствующих горизонтально расположенным нитям, необходимо выполнить операции постобработки: (1) подрезка хребтов (pruning) – 20 итераций; (2) операция эрозии с горизонтальным линейным структурирующим элементом размером 2 пикселя; (3) операция дилатации квадратным структурирующим элементом со стороной 3 пикселя; (4) скелетизация полученных бинарных объектов; (5) удаление мелких объектов площадью менее 20 пикселей.

Результаты этапов локализации хребтов на изображениях холста показаны на рис. 4. Далее, также как и в алгоритмах, представленных в предыдущем разделе, производится подсчет бинарных объектов в каждом столбце изображения, показанного на рис. 4 (г), и строится гистограмма (рис. 4(d)). Количество нитей определяется по максимуму гистограммы. Для образца, показанного на рис. 3(a) количество нитей составило 51.



Рис. 4 Иллюстрация работы алгоритма подсчета нитей на изображении холста картины на основе локализации хребтов: (а) изображение образца, показанного на рис. 3(а), после устранения неравномерности освещения; (б) хребты, найденные на изображении (а); (в) изображение хребтов после «стрижки», эрозии с линейным структурирующим элементом и дилатации; (г) изображение, полученное после удаления мелких объектов с изображения (в); (д) гистограмма подсчитанных бинарных объектов в столбцах изображения (г).

Предложенный в данном разделе алгоритм подсчета нитей на изображении образца холста картины сложнее алгоритмов, описанных выше, но он не требует операции пороговой бинаризации, которая дает некорректный результат на ряде изображений. В следующем разделе представлены результаты работы трех алгоритмов, применявшихся к фотографиям холстов картин XVIII века.

4 Эксперимент

Для подтверждения эффективности алгоритмов, описанных выше, проведен вычислительный эксперимент. Анализировались фрагменты изображений, полученных фотосъемкой пяти картин при освещении направленным источником, расположенным под или над картиной. Изображения фиксировались при нескольких значениях углов падения света в пределах 15–30 градусов относительно плоскости холста. На каждом из изображений выделялось три образца. Исследовалось 30 образцов, взятых с десяти изображений холстов. Образцы содержат от 50 до 110 нитей. Ширина образцов холста составила от 0.7 до 1.7 см, а высота – от 4.8 до 8.7 см, при этом ширина изображений образцов находилась в пределах 481 - 705 пикселей, а высота от 2085 до 3521 пикселя. На каждом образце тремя алгоритмами выполнялся подсчет горизонтальных нитей. Полученные значения сравнивались с результатами подсчета, выполненными экспертами. Гистограммы ошибок, построенные для трех алгоритмов показаны на рис. 5. На рис. 5 δ обозначает величину относительной ошибки подсчета количества нитей рассмотренными выше алгоритмами:

$$\delta = \frac{N_a - N_e}{N_e};\tag{6}$$

где N_a - количество нитей в образце, найденных алгоритмом, N_e - количество нитей, подсчитанных экспертом. Эксперимент показал, что алгоритм на базе метода пороговой бинаризации Отсу на 30% образцов дает точный результат, в 60% случаев ошибка не превосходит 5%, на 80% образцов ошибка находится в пределах 10%. На трех образцах получен отказ (на рис. 5 отказу соответствует величина $\delta = -0.95$). Эксперимент показал, что для анализа изображения образца размером 529 × 2777 пикселей затрачено 1.831 секунды.



Рис. 5 Гистограммы ошибок определения количества нитей на изображениях образцов холстов для трех алгоритмов: на базе метода Отсу (Otsu), метода Ниблака (Niblack) и метода локализации хребтов изображения (Ridges); δ - величина относительной ошибки, определяемой выражением (6); N – количество случаев появления значения относительной ошибки δ .

Алгоритм на основе локального алгоритма бинаризации Ниблака показал точный результат в 30% случаев. Ошибка в пределах 5% получена на 60% образцов. Ошибка, не превышающая 10%, получена на 87% изображений. Для подсчета числа нитей по изображению образца размером 529 × 2777 пикселей данный алгоритм затратил 37.736 секунды.

Для агоритма подсчета количества нитей по хребтам полутонового изображения на 67% образцов ошибка составила менее 5%, в остальных случаях не превысила 10%. При этом для анализа изображения образца размером 529 × 2777 пикселей затрачено 48.2961 секунды.

На практике плотность холста измеряется экспертами в количестве нитей, приходящихся на единицу длины в определенном направлении, и обычно выражается целыми числами [3], или диапазоном целых чисел. Рассмотренные в статье алгоритм на базе метода Отсу в 70% случаев показывает ошибку определения плотности в пределах 1 нити на сантиметр, на базе метода Ниблака – в 83%, а алгоритм на основе хребтов – в 97% случаев.

Анализ результатов показал, что относительно большие величины ошибок получены на холстах с загрязнениями, повреждениями нитей и проступающим грунтом. Улучшить результаты возможно с помощью подстройки параметров алгоритмов (кроме алгоритма на основе пороговой бинаризации Отсу) в зависимости от особенностей изображений. Целесообразно также для измерения плотности холста применять несколько алгоритмов, что позволит повысить точность измерений. Значительное рассогласование результатов может подсказать экспертам обратить внимание на «трудный случай». Представленные результаты соответствуют результатам, приведенным в публикациях по данной тематике (см. введение) и полученных на рентгеновских изображениях картин или изображениях, получаемых при контроле качества в текстильном производстве.

5 Заключение

В статье решалась задача подсчета количества нитей на изображениях холстов картин, необходимая для определения плотности холста и ряда других параметров, используемых искусствоведами для датировки произведений живописи. Особенностью исследования является использование изображений, полученных при направленном под острым углом по отношению к холсту освещении, а также применение гистограмм измерений количества нитей, выполняемых по каждому строке/столбцу матрицы обработанного изображения. Для анализа изображений образцов использовались предложенные модификации известного алгоритма, основанного на фильтрации в Фурье-области и пороговой бинаризации, а также новый алгоритм на основе локализации хребтов полутоновых изображений. Для пороговой бинаризации применялись методы Отсу и Ниблака. Проведен вычислительный эксперимент по исследованию холстов пяти портретов работы русских художников XVIII века.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Алгоритм на основе метода Отсу не имеет параметров и обладает хорошей точностью и высоким быстродействием. Однако на нескольких изображениях этот алгоритм дал неприемлемый результат. Алгоритм на базе метода Ниблака требует настройки двух параметров и больших вычислительных затрат по сравнению с алгоритмом с глобальным методом бинаризации, но показал в среднем более высокую точность определения плотности. Алгоритм измерения на основе хребтов полутонового изображения требует настройки большего количества параметров и существенно больших вычислительных затрат, по сравнению с другими алгоритмами, но показал наилучший результат по точности измерения в пределах допуска, приемлемого для экспертизы и атрибуции. Исследованные алгоритмы обеспечивают измерение плотности холста с точностью в пределах одной нити на сантиметр на 70 – 97 процентах изображений образцов. Для повышения надежности измерений плотности холста при исследованиях картин предпочтительно использовать несколько алгоритмов. Результаты вычислительного эксперимента соответствуют результатам известных алгоритмов измерения плотности холста по рентгеновским изображениям картин или изображениям, получаемым при контроле качества в текстильном производстве. Ускорить работу алгоритмов можно за счет масштабирования входных изображений, а повысить

точность можно автоматической подстройкой параметров алгоритмов. Эти аспекты указывают направления дальнейших исследований.

Литература

- Cobbe A. Colourmen's canvas stamps as an aid to dating paintings: a classification of winsor and newton canvas stamps from 1839-1920 // Studies in conservation, 1976. Vol. 21. No. 2. P. 85–94.
- [2] de Carbonnel K. V. A study of french painting canvases // Journal of the American Institute for Conservation, 1980. Vol. 20. No. 1. P. 3–20.
- [3] Мазина А. Я. Исследование холстов русских художников 19-20 веков, 2009. С. 131–135.
- [4] Мазина А. Я. Исследование холстов и грунтов Ю.Ю.Клевера, 2014. С. 108.
- [5] Косолапов А. И. Естественнонаучные методы в экспертизе произведений искусства. 2010.
- [6] Иванова Е. Ю. Живопись и время Российское портретное наследие 17-19 вв. Исследование, реставрация, атрибуция. — М: ГИМ, 2004. С. 170.
- [7] Cornelis B., Dooms A., Cornelis J., Leen F., Schelkens P.. Digital painting analysis, at the cross section of engineering, mathematics and culture // Signal Processing Conference, 2011 19th European. — 2011. P. 1254–1258.
- [8] Johnson D. H., Johnson Jr. C. R., Erdmann R. G. Weave analysis of paintings on canvas from radiographs // Signal Processing, 2013. Vol. 93. No. 3. P. 527–540.
- van der Maaten L., Erdmann R. G. Automatic thread-level canvas analysis: A machine-learning approach to analyzing the canvas of paintings // IEEE Signal Processing Magazine, 2015. Vol. 32. No. 4. P. 38–45.
- [10] van der Maaten L. et al. Software for automatic analysis of terahertz images // INSIDDE. Collaborative Project FP7-600849, 2011-2014.
- [11] Klein A., Johnson D., Sethares W. A., Lee H., Johnson C. R., Hendriks E. Algorithms for old master painting canvas thread counting from x-rays // 2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2008. P. 1229–1233.
- [12] Johnson D. H., Johnson C., Klein A. G., Sethares W. A., Lee H., Hendriks E. A thread counting algorithm for art forensics // 2009 IEEE 13th Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop, 2009. P. 679–684.
- [13] Johnson Jr. C. R., Hendriks E., Noble P., Franken M. Advances in computer-assisted canvas examination: Thread counting algorithms // 37th Annual Meeting of American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Los Angeles, CA. – 2009.
- [14] Dagel D., Sethares W. A. A method of thread enhancement and thread counting // Univ. of Wisconsin Technical Report UW-DD2007, 2007.
- [15] Pan R., Gao W., Li Z., Gou J., Zhang J., Zhu D. Measuring thread densities of woven fabric using the fourier transform // Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2015.
- [16] Niblack W. An introduction to digital image processing. -1986. Vol. 34.
- [17] Aldemir Erdoğan, Özdemir Hakan, Sarı Zekeriya. An improved gray line profile method to inspect the warp-weft density of fabrics // The Journal of The Textile Institute, 2018. P. 1–12.
- [18] Yang H., Lu J., Brown W. P., Daubechies I., Ying Lexing. Quantitative canvas weave analysis using 2-d synchrosqueezed transforms: Application of time-frequency analysis to art investigation // Signal Processing Magazine, IEEE, 2015. P. 55–63.
- [19] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1979. Vol. 9. No. 1. P. 62–66.
- [20] Eberly D. Ridges in image and data analysis. Computational Imaging and Vision Series. -1996.
- [21] Soille P.. Morphological image analysis: principles and applications. 2013.

Painting canvas thread counting from images obtained in raking light^{*}

D. M. Murashov¹, A. V. Berezin², and E. Yu. Ivanova³

d_murashov@mail.ru; berezin_aleks@mail.ru; ivanova-e-u@yandex.ru ¹FRC CSC RAS, Moscow; ²State Historical Museum, Moscow; ³Glazunov Academy, Moscow

This paper deals with the problem of painting thread counting from images. It is necessary to determine the characteristics used by art historians for dating works of art.

In the last few years, automated algorithms for calculating canvas characteristics from x-ray and high-quality terahertz images have been developed. To control the fabric density in textile industry, microscopic photographs, obtained when the fabric sample is illuminated by a light transmitted source, are used. The peculiarity of our research is acquiring canvas images in raking light. This way of acquiring images allowed to emphasize the texture of the canvas in the specified direction.

For the analysis of canvas sample images we propose modifications of known algorithm based on a filtering in the Fourier domain and thresholding, and the new algorithm based on localizing grayscale image ridges. In known works, the number of threads is determined by the Fourier spectrum peaks or by the baselines in the canvas image. In this paper, the counting of threads is performed over all rows / columns of the image matrix, and a histogram is constructed based on the results. The desired number of threads is determined by the maximum of the histogram obtained. The use of histograms allows to reduce inaccuracy produced by artifacts obtained during image processing. For thresholding, Otsu and Niblack methods are applied.

A computing experiment on the study of canvases of five portraits by Russian artists of the 18th century was carried out. The results of the experiment show the following. The algorithm based on the Otsu method does not require parameters and has acceptable accuracy and high speed. However, on several images this algorithm gave an unacceptable result. The algorithm based on the Niblack method requires setting up two parameters and computationally expensive compared to the algorithm with the global threshold method, but showed on average a higher density measurement accuracy. The measurement algorithm based on localizing grayscale image ridges requires setting more parameters and significantly higher computational costs than other algorithms, but has shown the best result in measuring accuracy within the error limit acceptable for expertise and attribution of paintings. The researched algorithms provide the accuracy of measuring the canvas density from within one thread per centimeter for 70-97 percents of the sample images. The results of the computing experiment correspond to the results of known algorithms for measuring canvas density from x-ray images of paintings. To improve the reliability the canvas density measurements in painting analysis is preferable to use several algorithms.

Further research will be aimed at improving the accuracy and speed of the algorithms.

Keywords: canvas of a painting; canvas thread; canvas density; image analysis; Fourier transform; grayscale image ridge; mathematical morphology

DOI: 10.21469/22233792.4.2.05

^{*}The research was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 18-07-01385).

References

- [1] Cobbe, A. 1976. Colourmen's canvas stamps as an aid to dating paintings: a classification of winsor and newton canvas stamps from 1839-1920. *Studies in conservation* 21(2):85–94.
- [2] Carbonnel, K. V. d. 1980. A study of french painting canvases. *Journal of the American Institute for Conservation* 20(1):3–20.
- [3] Mazina, A. Y. 2009. Study of canvases of russian artists of the 19th-20th centuries [issledovaniye kholstov russkih hudozhnikov 19-20 vekov] 131–135.
- [4] Mazina, A. Y. 2014. Study of yu.yu.klever's canvases and grounds [issledovanie holstov i gruntov yu.yu.klevera] 108.
- [5] Kosolapov, A. I. 2010. Natural science methods in the examination of works of art [Estestvennonauchnye metody v ehkspertize proizvedenij iskusstva]. Publishing House of the State Hermitage[Izd-vo Gos. Ermitazha].
- [6] IvanovaE.Yu. 2004. Painting and time Russian portrait heritage of the 17th-19th centuries. Research, restoration, attribution [ZHivopis' i vremya Rossijskoe portretnoe nasledie 17-19 vv. Issledovanie, restavraciya, atribuciya]. Moscow: SHM[GIM]. 170.
- [7] Cornelis, B., A. Dooms, J. Cornelis, F. Leen, and P. Schelkens. 2011. Digital painting analysis, at the cross section of engineering, mathematics and culture. *Signal Processing Conference*, 2011 19th European. 1254–1258.
- [8] Johnson, D. H., C. R. Johnson Jr, and R. G. Erdmann. 2013. Weave analysis of paintings on canvas from radiographs. *Signal Processing* 93(3):527–540.
- [9] van der Maaten, L., and R. G. Erdmann. 2015. Automatic thread-level canvas analysis: A machine-learning approach to analyzing the canvas of paintings. *IEEE Signal Processing Maga*zine 32(4):38–45.
- [10] van der Maaten et al., L. 2011–2014. Software for automatic analysis of terahertz images. IN-SIDDE. Collaborative Project FP7–600849.
- [11] Klein, A., D. Johnson, W. A. Sethares, H. Lee, C. R. Johnson et al. 2008. Algorithms for old master painting canvas thread counting from x-rays. 2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 1229-1233.
- [12] Johnson, D. H., C. Johnson, A. G. Klein, W. A. Sethares, H. Lee et al. 2009. A thread counting algorithm for art forensics. 2009 IEEE 13th Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop 679-684.
- [13] Johnson Jr, C. R., E. Hendriks, P. Noble, and M. Franken. 2009. Advances in computer-assisted canvas examination: Thread counting algorithms. 37th Annual Meeting of American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Los Angeles, CA.
- [14] Dagel, D., and W. Sethares. 2007. A method of thread enhancement and thread counting.
- [15] Pan, R., W. Gao, Z. Li, J. Gou, J. Zhang et al. 2015. Measuring thread densities of woven fabric using the fourier transform. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*.
- [16] Niblack, W. 1986. An introduction to digital image processing. Prentice-Hall Englewood Cliffs. Vol. 34.
- [17] Aldemir, E., H. Özdemir, and Z. Sarı. 2018. An improved gray line profile method to inspect the warp-weft density of fabrics. *The Journal of The Textile Institute* 1–12.
- [18] Yang, H., J. Lu, W. P. Brown, I. Daubechies, and L. Ying. 2015. Quantitative canvas weave analysis using 2-d synchrosqueezed transforms: Application of time-frequency analysis to art investigation. *Signal Processing Magazine*, *IEEE* 55–63.
- [19] Otsu, N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics 9(1):62–66.

- [20] Eberly, D. 1996. *Ridges in image and data analysis. Computational Imaging and Vision Series.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL.
- [21] Soille, P. 2013. Morphological image analysis: principles and applications. Springer Science & Business Media.

Received October 26, 2018