

Алгоритмы подсчета нитей холстов картин по изображениям на основе максимизации взаимной информации

Мурашов Д.М.¹, Березин А.В.², Иванова Е.Ю.³

¹ФИЦ ИУ РАН, Москва

² Государственный Исторический музей, Москва

³ РАЖВиЗ Ильи Глазунова, Москва

d_murashov@mail.ru, berezin_aleks@mail.ru, ivanova-e-u@yandex.ru

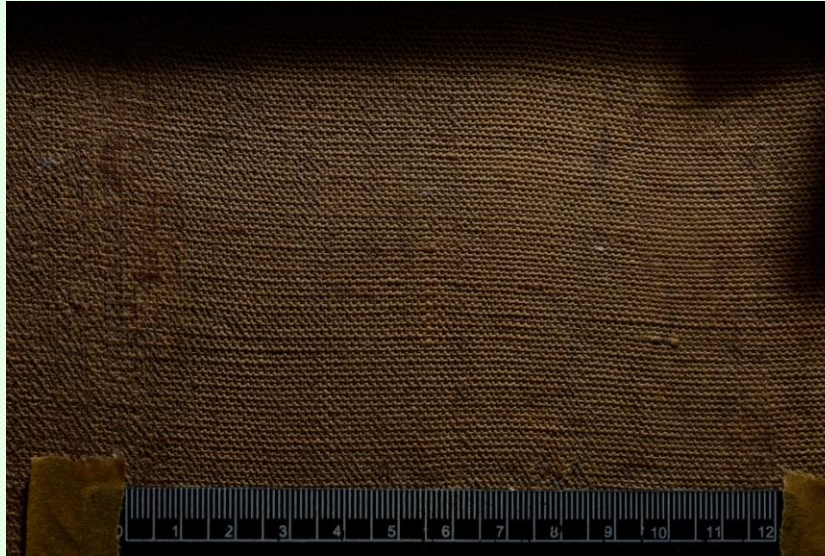
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 18-07-01385 и № 18-07-01231.

Всероссийская конференция с международным участием
<<МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ>>

26-29 ноября 2019 г.

Москва

Задача



Изображение холста картины

Требуется подсчитать количество нитей в образце по двум направлениям.

Подсчет нитей необходим для определения характеристик холста, используемых при датировке картин (Мазина А.Я., 2014; Иванова Е.Ю., 2004; Косолапов А. И., 2010).

Традиционно эта операция выполнялась вручную.

Известные подходы

1. Автоматизированные алгоритмы определения характеристик холстов по рентгеновским изображениям (Johnson, C. R., et al., 2008 - 2013).
2. Алгоритмы определения характеристик холстов по высококачественным терагерцевым изображениям (van der Maaten L., et al., 2011–2014).
3. Измерение плотности шерстяной ткани по микрофотографиям в проходящем свете (Pan R.W. et al. 2015).

Недостатки известных подходов:

- свинцовые белила в грунте затрудняют использование рентгеновских изображений;
- терагерцевое оборудование не применяется в музеях;
- красочный слой не пропускает свет.

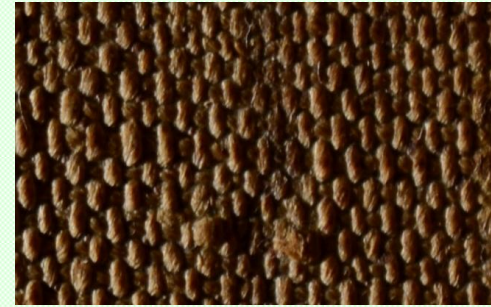
Предложенный подход:

Съемка холста в направленном свете. Направленный свет позволяет подчеркнуть текстуру в определенном направлении.

Свойства изображений холста

Свойства изображений холстов:

- искривление нитей из-за неравномерного натяжения холста;
- переменная толщина нити;
- повреждения;
- просачивание грунта;
- загрязнение.



Съемка

Изображения фиксируются 24 MP CCD камерой Nikon 86 D 7100.

Объектив: Nikon AF-S Micro NIKKOR 40mm 1 : 2,8 G.

Осветительные приборы : LOWEL TOTA-LIGHT T1-10, lamp: EMF Q800T34 MIN 800W 240V R7s.

Расстояние: 30 см.

Угол падения света: от 10 до 30 градусов к плоскости картины;

Размер изображения: 6000×4000 пикселей;

Модель изображения холста

Модель изображения холста:

$$I(\mathbf{x}) = I_0 + a \cdot \sin(2\pi \mathbf{k}^T \mathbf{x} - \varphi) + n(\mathbf{x}),$$

где $I(\mathbf{x})$ - значение уровня серого тона в точке \mathbf{x} с координатами (x, y) ;

I_0 - сдвиг уровня серого; a - амплитуда; $\mathbf{k} = (k_1, k_2)^T$ - вектор волновых чисел; φ - фаза; $n(\mathbf{x})$ - периодическая функция, моделирующая переплетения нитей.



Модель изображения холста в направленном свете при $k_1=0$ и $n(\mathbf{x})=0$.

Алгоритм подсчета нитей

Применяются модификации методов, предложенных E. Shady, et al. (2012) и R.W. Pan, et al. (2015).

1. Предобработка: эквализация гистограммы.
2. Фильтрация изображения: $I_F(\mathbf{x}) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{I(\mathbf{x})\}I_M(\mathbf{x})\}$,
где $I_F(\mathbf{x})$ - фильтрованное изображение; $I_M(\mathbf{x})$ - маска фильтра.
3. Обработка изображения после фильтрации.
4. Пороговая бинаризация

$$I_T(\mathbf{x}) = \begin{cases} 255, & \text{если } I_F(\mathbf{x}) \geq T^* \\ 0, & \text{если } I_F(\mathbf{x}) < T^* \end{cases}.$$

5. Постобработка.
6. Подсчет бинарных объектов в столбцах изображения.

Пороговая бинаризация

1.Метод на основе глобального критерия максимума взаимной информации (“maximum segmented image information”, С.К. Leung and F. Lam, 1998).

Модель системы: $I_{Bin} = T(I_p, t);$

где I_p и I_{Bin} - дискретные случайные переменные, описывающие входное и бинарное изображения.

Порог: $t = \arg \max_t [MI(I_p, I_{Bin}(t))];$

$MI(I_p, I_{Bin}(t)) = H(I_{Bin}) - H(I_{Bin} | I_p); \quad P(0) = P(255).$

2.Метод на основе локального критерия максимума взаимной информации

$$t = \arg \max_t [MI_W(I_p, I_{Bin}(t))]$$

где MI_W - величина взаимной информации, вычисленная в окне $W(30 \times 30)$.

Обработка изображений

Предобработка

- Эквиализация гистограммы.

Обработка после фильтрации

- Коррекция неравномерной освещенности

$$I_{proc} = \phi_{3B} \left(\left[\phi_{11B} (I_F) - I_F \right] / \phi_{11B} (I_F) \right).$$

Постобработка (после бинаризации)

- Дилатация.

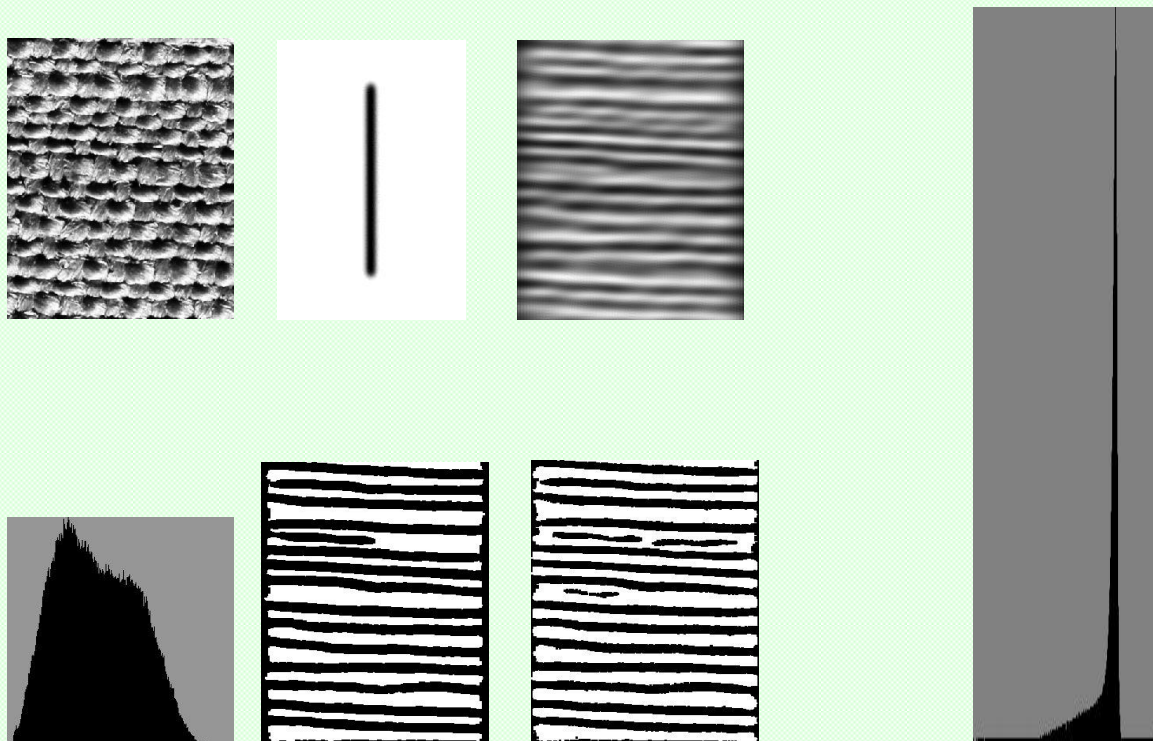
- Эрозия

$$I^* = \varepsilon_{5B} (\delta_{3B} (I_{Bin})).$$

- Заполнение “дыр”

$$I_{FH} = FILL(I^*).$$

Метод на основе критерия максимума взаимной информации



Основные операции алгоритма

Вычислительный эксперимент

Задачи эксперимента:

- (1) выбрать наилучшее пространственное разрешение изображений;
- (2) оценить точность алгоритмов.

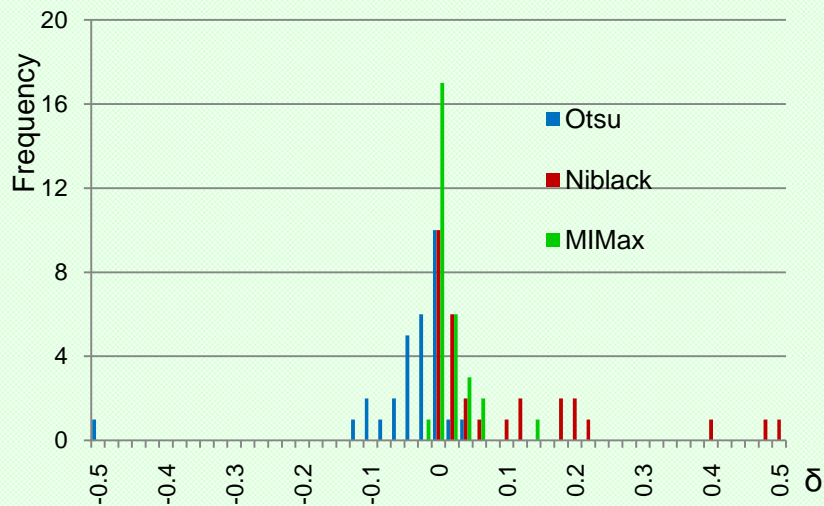
Сравнивались алгоритмы на основе методов бинаризации Ниблэка и Отсу (Niblack-based и Otsu-based), алгоритмы на основе метода бинаризации по критерию максимума взаимной информации (MIMax-based) и LocMIMax (LocMIMax-based).

Этап 1.

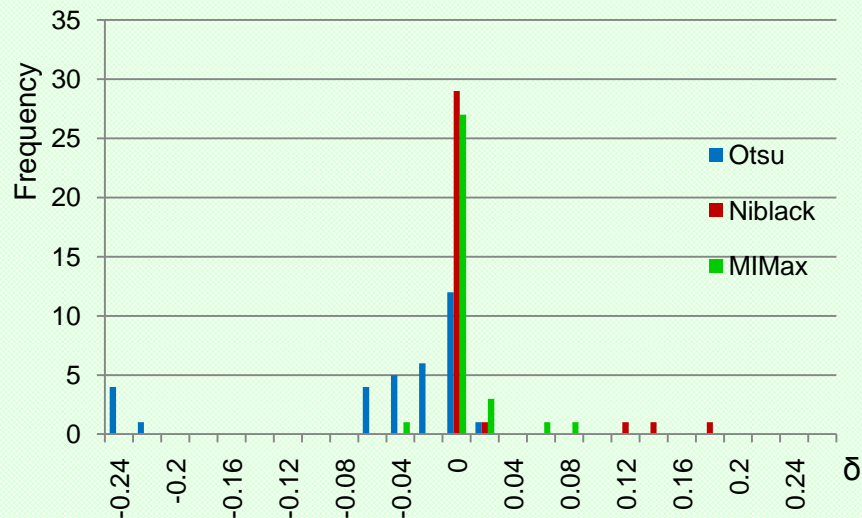
1. 30 изображений образцов с 10 картин русских художников 18 века: 3 изображения с одной картины.
2. Изображения получены при освещении под углом от 15 до 30 градусов.
3. Размеры образцов: ширина - от 0.7 до 1.7 см; высота - от 4.8 до 8.7 см.
4. Размеры изображений образцов:
ширина - от 481 до 705 pixels; высота - от 2085 до 3521 пикселей.
5. Изображение содержит от 50 до 110 нитей.
6. Три значения масштаба: 1, 0.75, 0.5.

Результаты эксперимента

Этап 1



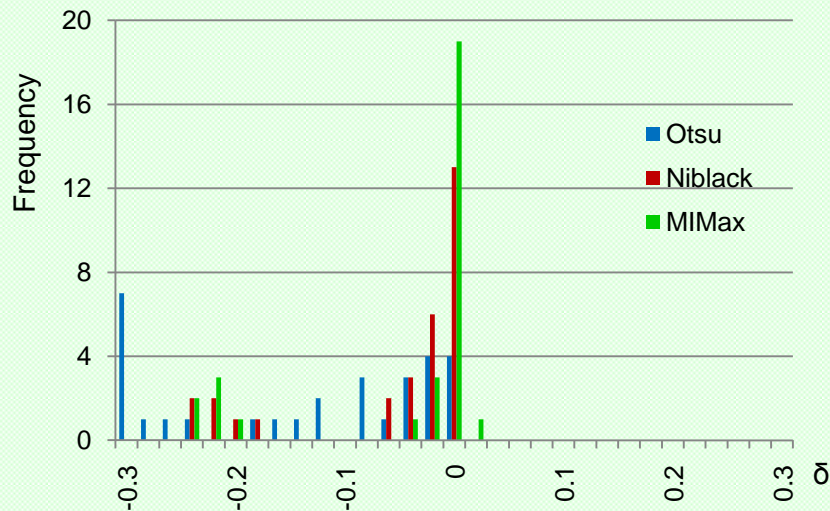
Масштаб = 1 (390 - 675 pix/cm)



Масштаб = 0.75 (292.5 - 506 pix/cm)

Относительная ошибка:

$$\delta = \frac{N_a - N_e}{N_e}$$



Масштаб = 0.5 (195 - 337 pix/cm)

Результаты эксперимента

Этап 1.

Среднее значение и СКО относительной ошибки при различных масштабах изображений текстурных образцов.

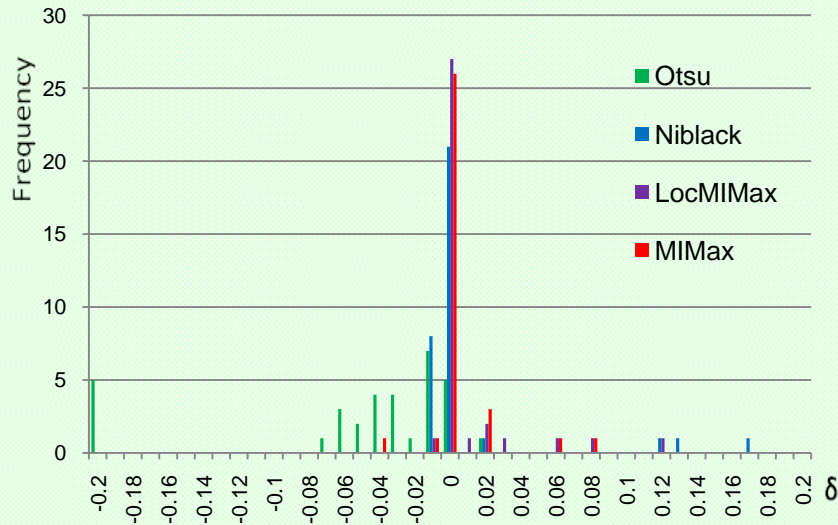
Алгоритм	Масштаб		
	1	0.75	0.5
Otsu-based	-0.26 / 0.345	-0.045 / 0.049	-0.066 / 0.178
Niblack-based	-0.064 / 0.083	0.0044 / 0.047	0.093 / 0.141
MIMax-based	-0.055 / 0.09	-0.00095 / 0.024	0.012 / 0.028

Этап 2.

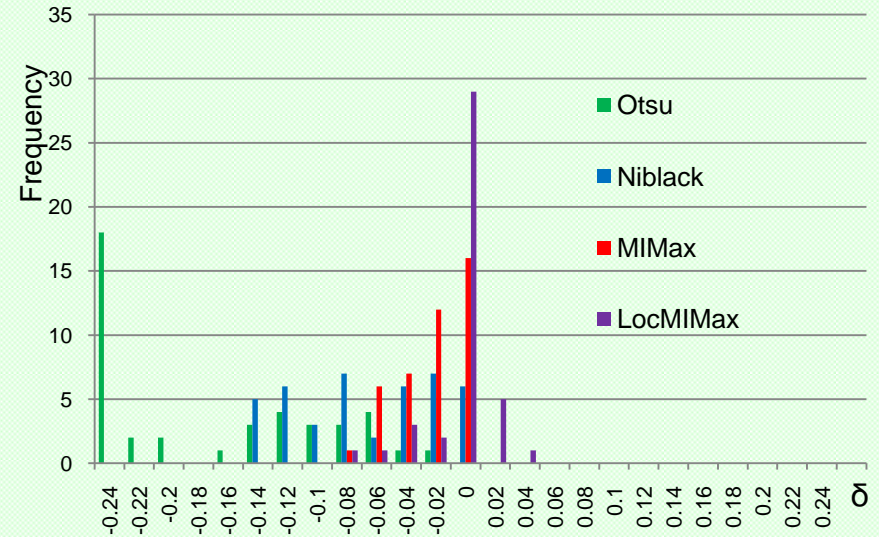
1. Измерения количества нитей основы проводились на 33 изображениях, а нитей утка - на 42 изображениях.
2. Масштаб: 0,75 (разрешение - 292.5 до 506.25 пикселей на сантиметр).

Результаты эксперимента

Основа



Уток



Время обработки
изображения 529 x 2777
пикселей:

Алгоритм	Время(с)
Otsu-based	1.83
Niblack-based	37.74
MIMax	1.9

Алгоритм	% образцов, на которых ошибка не превышает 1 нить/см	
	Основа	Уток
Otsu-based	92,8	0
Niblack-based	83	60
MIMax	100	88
Local MIMax	97	95

Результаты эксперимента

Этап 2.

Среднее значение и СКО относительной ошибки подсчета нитей основы и утка.

Алгоритм	Тип нитей	
	Основа	Уток
Otsu-based	-0.15 / 0.32	-0.33 / 0.31
Niblack-based	0.009 / 0.042	-0.076 / 0.046
MIMax-based	0.003 / 0.019	-0.032 / 0.025
Local MIMax-based	0.0067 / 0.025	-0.01 / 0.021

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассматривалась задача определения характеристик холстов произведений живописи.
2. Использовались изображения холстов, зафиксированные при направленном освещении. Направленный свет позволяет подчеркнуть текстуру холста в заданном направлении.
3. Предложены алгоритмы подсчета нитей, включающие операции фильтрации в Фурье-области и пороговой бинаризации на основе критерия максимума взаимной информации.
4. Проведен вычислительный эксперимент по исследованию холстов пяти портретов работы русских художников XVIII века.
5. Проведено сравнение результатов предложенных и двух известных алгоритмов. Алгоритм измерения на основе максимизации взаимной информации показал наилучший результат по точности измерения.
6. При подсчете нитей основы алгоритмы на базе критерия максимума взаимной информации обеспечили точность в пределах одной нити на сантиметр в 100% образцов, при подсчете нитей утка – в 95% образцов.