

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Научная статья

УДК 677.017.4:620.171.3

EDN GXCFVT

doi 10.34216/2587-6147-2024-1-63-5-11

Александр Валерьевич Орлов¹

Евгений Львович Пашин²

¹ Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

² Костромская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кострома, Россия

¹ aorlov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4995-3393>

² evgpashin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5871-874X>

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ТОНИНЫ СОВОКУПНОСТИ ВОЛОКОН ПОСРЕДСТВОМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 23-26-00147).*

Аннотация. Рассматривается метод косвенной оценки линейной плотности лубяных волокон по их тонине, основанный на анализе цифрового изображения волокнистой пробы с применением алгоритма «карты расстояний» (distance transform). Идентифицируются погрешности, возникающие при практическом применении данного метода. Источниками погрешностей являются перекрещивание отдельных волокон в пробе и особенности формы топологического скелета в зонах окончаний волокон. На базе проведенного анализа создано программное обеспечение, позволяющее выполнять моделирование влияния этих факторов на общую погрешность измерения тонины волокон. Моделирование производится методом построения схематического изображения волокон с заранее известными параметрами с последующим его анализом с применением алгоритма «карты расстояний». Влияние рассматриваемых факторов на распределение измеренных значений тонины хорошо согласуется с теоретическими выкладками. По результатам исследования предложено направление дальнейшего совершенствования модельного эксперимента с целью учета особенностей размещения волокон в пробе.

Ключевые слова: компьютерное зрение, линейная плотность, лубяное волокно, топологический скелет, алгоритм distance transform, пересечения, моделирование

Для цитирования: Орлов А. В., Пашин Е. Л. Особенности оценки тонины совокупности волокон посредством технического зрения // Технологии и качество. 2024. № 1(63). С. 5–11. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-1-63-5-11>.

Original article

Alexander V. Orlov¹

Evgeny L. Pashin²

¹ Kostroma State University, Kostroma, Russia

² Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russia

MEASURING THICKNESS OF FLAX FIBRES IN A CLUSTER USING COMPUTER VISION

Abstract. Authors analyse a method of indirect measurement of flax fibre linear density using its thickness, based on computer vision approach and “distance transform” algorithm in particular. A number of flaws of this method are identified. The main reason for the discrepancy is the effect of crossed fibres within the ana-

© Орлов А. В., Пашин Е. Л., 2024

lysed sample. The secondary reason is the specific shape of fibre's topological skeleton near its tips. Based on these observations, a software model of the problem has been created. The software produces a simplified image of crossed fibres with specified properties, and measures this image using the above method. The effect of various factors on the discrepancy in the distribution of thickness values appears to match well with theoretical analysis. Additionally, a number of ways to improve the software model are outlined, related to how typically fibres are oriented within the analysed sample.

Keywords: computer vision, linear density, bast fibre, distance transform, topological skeleton, crossing, software model

For citation: Orlov A. V., Pashin E. L. Measuring thickness of flax fibres in a cluster using computer vision. Technologies & Quality. 2024. No 1(63). P. 5–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-1-63-5-11>.

Для повышения точности оценки линейной плотности лубяных волокон в виде их тонины посредством технического зрения в развитие ранее предложенных вариантов анализа [1–3] был предложен метод, основанный на применении алгоритма построения «карты расстояний» (*distance transform*), который реализовали в патенте [4]. Метод предусматривает наличие двумерного цифрового изображения отдельных расположенных волокон криволинейной формы, поиск для них топологического скелета как оси волокна, с применением известного метода [5], построение карты расстояний [6], а на завершающем этапе – определение тонины как усредненной величины оптоволоконной ширины по совокупной длине анализируемых волокон. По результатам анализа, наряду со средним значением тонины, предусматривали получение информации о характере распределения тонины в виде гистограммы.

Однако известные варианты методов испытания [1–4] требуют расположения в области их анализа на цифровом изображении волокон

в виде единичных объектов, изолированных друг от друга. Применительно к натуральным волокнам (хлопок, шерсть, котонин и др.), представляющим собой криволинейные объекты с разной длиной при общем их количестве в области анализа 1000 шт. и более, такие требования приводят к увеличению продолжительности анализа. Это объясняется значительным временем, необходимым на выполняемое вручную расположение волокон в виде единичных объектов на предметном столе микроскопа. При отсутствии такой подготовки волокон время их расположения на предметном столе сокращается в 2 и более раз. Однако в этом случае на цифровом изображении будут в значительном количестве представлены комплексы, состоящие из соприкасающихся и пересекающихся волокон, как это представлено на рис. 1. Такое расположение будет неизбежно оказывать влияние на форму и размеры топологического скелета волокон и, как следствие, на результаты расчетов тонины с использованием алгоритма «карты расстояний».

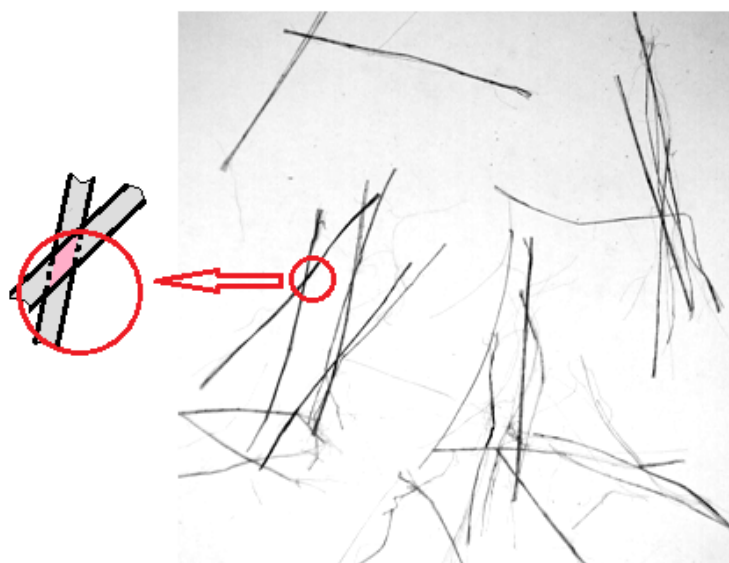


Рис. 1. Типичное расположение волокон на предметном столе при анализе

При использовании способа испытания [4] выявлено, что применение алгоритмов, связанных с построением топологического скелета и расчетом оптоволоконной ширины с использованием «карты расстояний», формирует также определенную погрешность при оценке тонины концевых участков волокон. На этих участках в зависимости от тонины волокон форма топологического скелета отклоняется от линейной.

С учетом указанных особенностей расположения анализируемых волокон и возникающих из-за этого негативных последствий результатов анализа тонины возникает необходимость совершенствования метода [4]. Поэтому целью исследования является повышение точности оценки тонины волокон посредством учета реального их взаимного расположения при анализе с использованием технического зрения.

Отметим, что на результат изменения формы и размера топологического скелета от пересечения волокон могут влиять разные факторы. Во-первых, это угол между волокнами. При угле пересечения, близком к 90 градусам, область перекрытия сравнительно невелика по сравнению с площадью, занимаемой волокнами. Однако по мере уменьшения угла область перекрытия начинает занимать значительную долю от совокупной площади волокон, что увеличивает влияние этого явления на оптоволоконную ширину таких волокон.

Поясим это на примере. Алгоритм «карты расстояний», применяемый в патенте [4], принимает на вход при анализе маску расположения объектов на снимке, и для каждого пиксела маски получает расстояние до ближайшего пиксела фона (рис. 2).

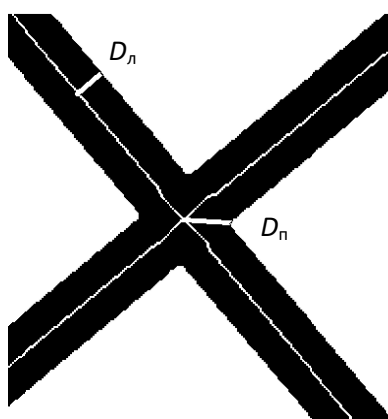


Рис. 2. Различия в оценке тонины линейных участков волокон $D_{л}$ и пересекающихся участков $D_{п}$

В точках пересечения волокон расстояние от центральной точки до ближайшего пиксела фона $D_{п}$ увеличится по сравнению с расстоянием от середины до края одиночного волокна $D_{л}$, как

это показано на рис. 2. В простейшем случае для двух перпендикулярных волокон равной тонины эта величина увеличится в 1,41 раза в точке пересечения осей волокон и будет убывать по мере приближения к границам области пересечения. В случаях когда угол между волокнами будет меньше, завышение будет не таким большим, но область, в которой завышение наблюдается, будет значительно больше. Таким образом, пересечения будут приводить к системному завышению измеренных значений тонины.

Другим фактором, влияющим на форму и размер топологического скелета от пересечения волокон, является их оптоволоконная ширина. Алгоритм, используемый в патенте [4], производит оценку тонины волокна вдоль всей его длины, поэтому для длинных и тонких волокон доля, занимаемая областью перекрытия, будет незначительной. В то же время для сравнительно толстых и коротких волокон при малых углах пересечения может наблюдаться ситуация, когда два волокна визуально сливаются. В этом случае средняя тонина будет неотличима от волокна с повышенной шириной. Помимо влияния на пересечения, оптоволоконная ширина волокон оказывает влияние на концевые эффекты, возникающие при формировании топологического скелета. Для тонких волокон топологический скелет имеет сравнительно простую форму, тогда как по мере увеличения тонины на нем начинают появляться концевые разветвления. Это демонстрируется на рис. 3.

Заметим, что влияние концевых эффектов будет во многом противоположно влиянию пересечений, так как на концах волокон топологический скелет будет отклоняться от оси волокна и приближаться к краю волокна. В этой области карта расстояний будет иметь малые значения, а потому в выборку будут попадать значения, заниженные по сравнению с реальной оптоволоконной шириной волокна. Этот эффект будет более выражен для толстых волокон, так как в их случае скелет формирует разветвление на концах волокон, тем самым удваивая число заниженных значений в выборке.

Важной по степени влияния на форму и размеры скелета также является ориентация волокон в пробе. В простейшем случае можно предположить, что угол ориентации отдельных волокон в пробе является случайной величиной, подчиняющейся закону равномерного распределения. Иными словами, любой угол ориентации является равновероятным. Это верно для сравнительно коротких волокон.

С учетом рассмотренных эффектов, возникающих при анализе волокон без их отделе-

ния друг от друга, рассмотрим влияние пересечений и концевых эффектов на оценочные значения тонины волокна в пробе.

Для оценки влияния указанных эффектов на полученную выборку значений тонины волокна следует выбрать метрики сравнения. Очевидной метрикой будет являться средняя толщина как один из определяемых в ходе анализа показателей, имеющий наибольшее практическое значение. В то же время следует ожидать появления в выборке некоторого количества аномально высоких и аномально низких значений. Их влияние, вероятно, можно определить посредством величины стандартного отклоне-

ния значений выборки. Однако этот показатель может быть недостаточно информативен, так как при одинаковом стандартном отклонении можно составить выборки, имеющие разный характер распределения значений. Поэтому предлагается сравнивать законы распределения полученных значений тонины непосредственно, с помощью метрики расстояния Вассерштейна [7]. При ее применении полагают, что для двух распределений в диапазоне значений от 0 до 1, у которых сумма весов отдельных значений также равна 1, эта метрика будет равна нулю при полном совпадении распределений и единице при их полном несовпадении.

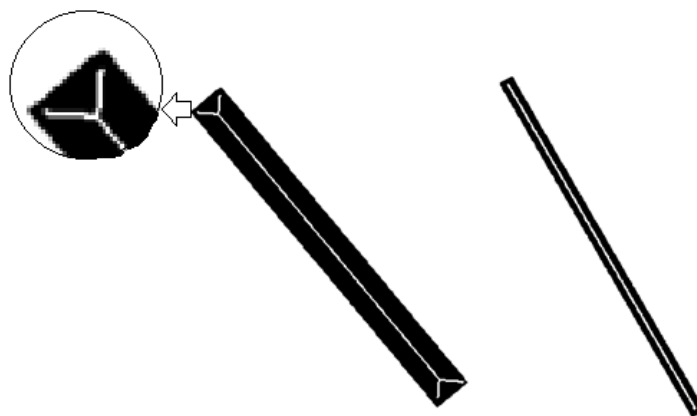


Рис. 3. Различия в форме топологического скелета для объектов разной тонины

Для эффективного анализа описанных эффектов было создано программное обеспечение (ПО) в виде приложения для ЭВМ, позволившее провести имитационное моделирование процесса оценки тонины волокон. При его использовании будем моделировать два волокна как наклонные прямоугольники с индивидуально заданной шириной и углом поворота относительно горизонтали. Эти прямоугольники отображаются на растровом изображении. Такой подход объясняется тем, что большинство популярных устройств для ввода изображений, таких как сканеры и камеры, генерируют именно растровые изображения [2] и многие алгоритмы анализа рассчитаны именно на такое представление изображения [5]. Общий алгоритм функционирования приложения представлен на рис. 4.

При имитационном моделировании рассматривали две модели. При одной из них волокна располагаются вблизи друг друга, без соприкосновения (рис. 5, а). При другой – они располагаются одно над другим, формируя пересечение (см. рис. 5, б). Раздельный анализ этих двух изображений позволяет оценить влияние пересечений на результат определения тонины.

Как следует из рис. 5, даже при отсутствии пересечения на топологическом скелете

изображенных моделей волокон наблюдаются концевые эффекты. Согласно указанному выше объяснению, это должно приводить к занижению измеренной тонины волокон из-за присутствия в распределении значений тонины повышенной доли заниженных значений. Этот эффект можно обнаружить при анализе гистограммы, представленной на рис. 6 (ее построение основано на результатах анализа изображения, приведенного на рис. 5, а).

На рис. 6 представлено два варианта гистограмм. Одна описывает реальное распределение тонины волокон, определенной исходя из заданных параметров модели. Вторая – распределение тонины, определенное в ходе измерения результата имитационного моделирования согласно методике [4]. Несмотря на значительную долю сходства между распределениями, можно наблюдать важные различия. В частности, возникает ненулевая доля измерений тонины с результатами в диапазонах 3...6 пикселей и 9...14 пикселей, которые заметно отклоняются от фактических значений тонины модельных волокон, составляющих 7 и 15 пикселей.

Аналогично, при анализе изображения с перекрещиванием (см. рис. 5, б) следует ожидать появления завышенных значений тонины

из-за влияния областей перекрещивания. Подтверждение этому следует из анализа гистограммы, представленной на рис. 7, где присутствует заметная доля измерений с результатами

1...19 пикселей. Эти значения не встречаются в результатах анализа изображения без пересечений и не могут быть объяснены иначе, чем влиянием областей пересечения.

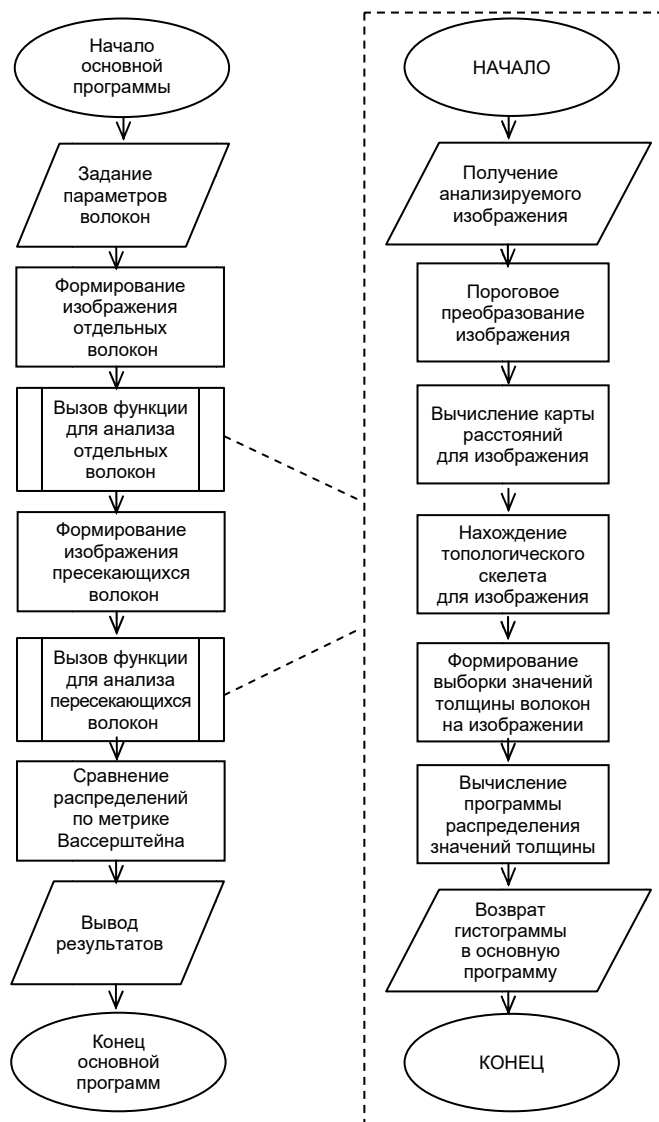


Рис. 4. Алгоритм численного моделирования оценки толщины волокон

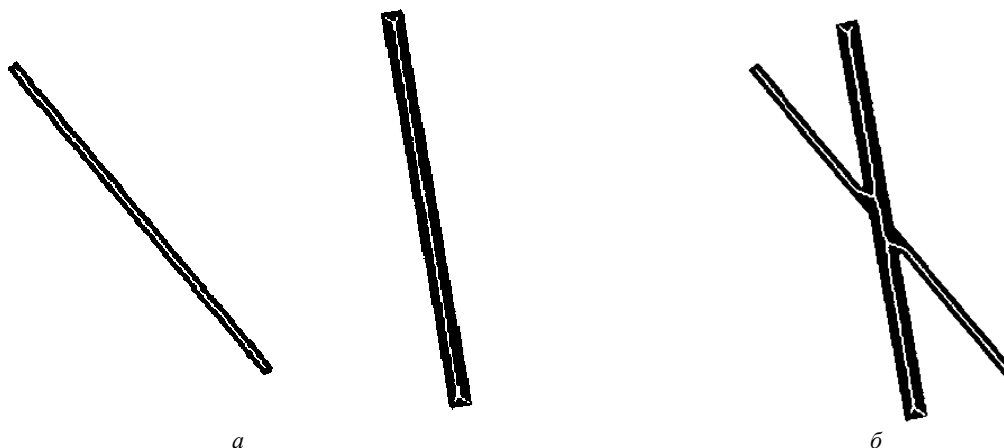


Рис. 5. Пример изображений изолированных волокон (а) и перекрещенных волокон (б), используемых при моделировании

Таким образом, результаты имитационного моделирования подтверждают негативное влияние пересечений на точность оценки тонины волокон с использованием метода с применением алгоритма «карта расстояний» с предварительным построением топологического скелета. Это подтверждается оценками сходства реального и моделируемого распределений по метрике расстояния Вассерштейна. Для случая без пересечений значение метрики составляет $WS_a = 0,019$. Для случая с пересечениями значение метрики возрастает до $WS_b = 0,025$.

Таким образом, возникает необходимость создания алгоритма коррекции описанных негативных эффектов применительно к методу [4].

При этом предложенный вариант программной модели (см. рис. 4) может быть востребован при повышении эффективности такого алгоритма.

Однако в ходе исследований в созданном программном обеспечении был отмечен ряд недостатков. Созданная имитационная модель предполагает обязательное наличие пересечений между волокнами. Однако на реальных цифровых изображениях только часть волокон будет пересекаться, а потому итоговое негативное влияние пересечений может быть снижено. Помимо этого, представляется трудоемким использование созданного ПО для моделирования выборок волокон с более сложным законом распределения.

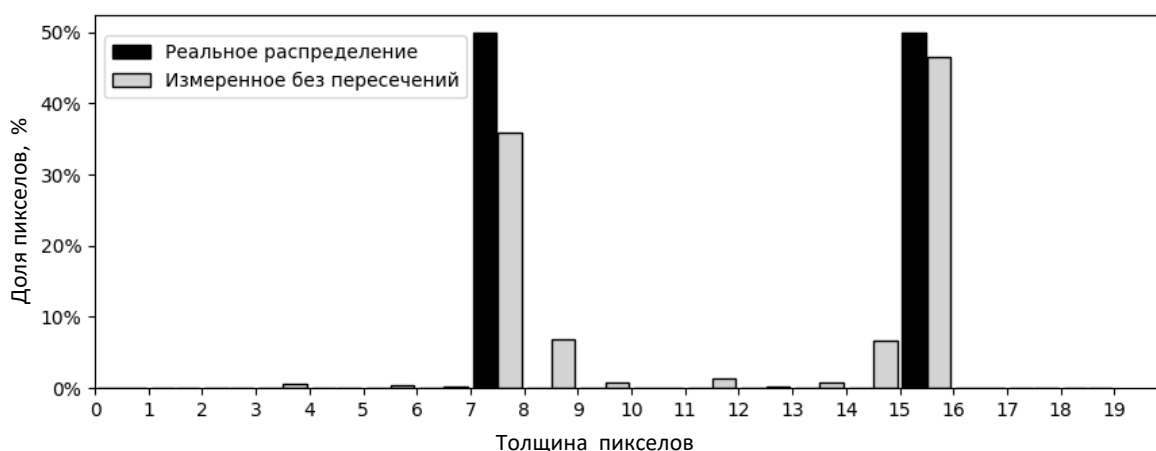


Рис. 6. Результаты анализа изображения без пересечений

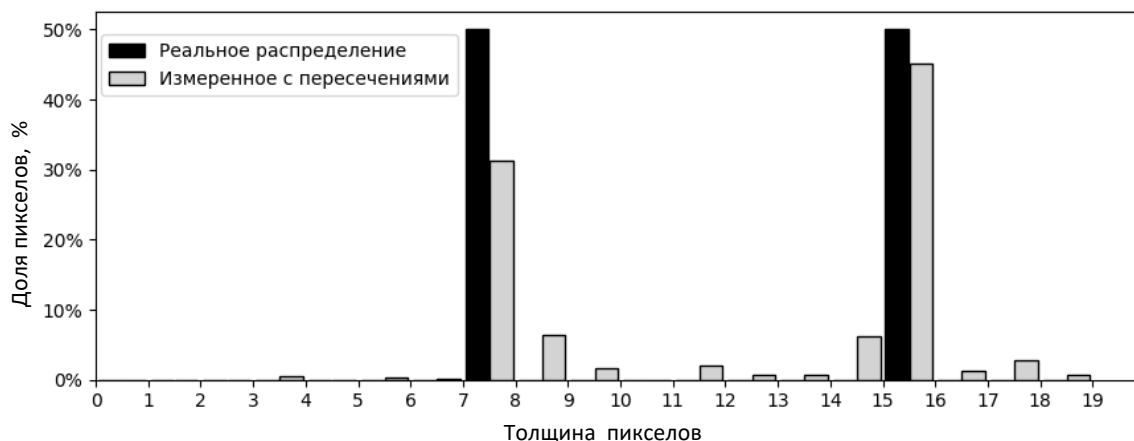


Рис. 7. Результаты анализа изображения с пересечением волокон

Поэтому для устранения указанных недостатков целесообразно усовершенствовать описанное модельное изображение, разместив на нем множество виртуальных волокон, параметры которых задаются вероятностно [8]. Параметры законов распределения при этом следует задавать на основе опытных данных. В этом случае структура модельного изображения будет сходной с изображениями, получаемым при съемке реальных образцов волокон.

ВЫВОДЫ

1. Методика оценки тонины волокон в виде их оптоволоконной ширины, основанная на использовании метода «карты расстояний» с предварительным построением топологического скелета, вносит специфический набор погрешностей в измеренные значения тонины. Из-за этого в полученной итоговой выборке тонины будет завышенное число anomalно больших и anomalно малых значений.

2. Причинами возникновения погрешностей тонины волокон являются наличие узлов перекрещивания волокон и эффекты, связанные с формой топологического скелета на концах волокон.

3. Доказанная зависимость погрешностей тонины волокон от их толщины и взаим-

ного расположения требует использования структурно-имитационного моделирования не отдельной пары волокон, а их совокупности, приближенной по свойствам и характеру распределения параметров к изображению реального образца.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орлов А. В., Пашин Е. Л. Разработка алгоритма расчета линейной плотности лубяных волокон с использованием технического зрения // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 5. С. 65–68.
2. Орлов А. В., Пашин Е. Л. Метод подготовки цифрового изображения пробы лубяных волокон для оптической оценки их геометрических характеристик // Технологии и качество. 2018. № 1. С. 43–47.
3. Орлов А. В., Пашин Е. Л. Обоснование условий освещения лубяных волокон при оценке их толщины с использованием машинного зрения // Технологии и качество. 2019. № 1. С. 21–25.
4. Патент РФ № 2779715. Способ оценки тонины лубяного волокна : Оpubл. 19.09.2022; Бюл. № 26 / Пашин Е. Л., Орлов А. В.
5. Serra J., Image Analysis and Mathematical Morphology. Orlando : Academic Press, 1982. 610 p.
6. Adaptively sampled distance fields: a general representation of shape for computer graphics / Gibson Sarah F. Frisken; Perry, Ronald N.; Rockwood, Alyn P.; Jones, Thouis R. (2000) // Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2000 / eds. Brown Judith R.; Akeley, Kurt. New Orleans : Association for Computing Machinery, 2000. P. 249–254.
7. Ramdas A., Garcia N., Cuturi M. On Wasserstein Two Sample Testing and Related Families of Nonparametric Tests // Entropy. 2017. T. 19, No 2. URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/19/2/47> (дата обращения: 19.11.2023).
8. Добрушин Р. Л. Задание системы случайных величин при помощи условных распределений // Теория вероятностей и ее применения. 1970. Т. 15, вып. 3. С. 469–497.

REFERENCES

1. Orlov A. V., Pashin E. L. Developing abast fiber linear density calculation algorithm based on computer vision. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2015;5:65–68. (In Russ.)
2. Orlov A. V., Pashin E. L. Preparation of digital images of a bast fiber sample for optical measurement of its geometrical properties. *Tekhnologii i kachestvo* [Technology & Quality]. 2018;1:43–47. (In Russ.)
3. Orlov A. V., Pashin E. L. Lighting conditions required for estimation of bast fibers' thickness using computer vision. *Tekhnologii i kachestvo* [Technology & Quality]. 2019;1:21–25. (In Russ.)
4. Pashin E. L., Orlov A. V. A method of measuring thickness of bast fiber. Russian Federation patent no. 2779715. Published 19.09.2022, issue 26. (In Russ.)
5. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. Orlando, Academic Press, 1982. 610 p.
6. Gibson S. F., Perry R. N., Rockwood A. P., Jones T. R. Adaptively sampled distance fields: a general representation of shape for computer graphics. Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2000. New Orleans, Association for Computing Machinery, 2000, pp. 249–254.
7. Ramdas A., Garcia N., Cuturi M. On Wasserstein Two Sample Testing and Related Families of Nonparametric Tests. Entropy. 2017;19(2). URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/19/2/47> (accessed 19.11.2023).
8. Dobrushin R. L. Defining a random variable system using conditional districutions. *Teoriya veroyatnostej i ee primeneniya* [Probability theory & its applications]. 1970;15(3):469–497. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 12.12.2023
Принята к публикации 6.03.2024