

МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЕМЯН К ВИЗУАЛЬНОМУ ДЕШИФРИРОВАНИЮ

П. А. Щукина, М. В. Архипов, Л. П. Гусакова, Н. С. Прияткин
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14
E-mail: prini@mail.ru

Поступила в редакцию 01 июня 2020 г., принята к печати 26 августа 2020 г.

Рассмотрены основные технические проблемы, возникающие при получении цифровых рентгеновских изображений семян: сферические, нелинейные, геометрические искажения, неинформативный шум, артефакты, неоднородность поглощения излучения при прохождении через исследуемый объект. Предложены и обоснованы пути их устранения. Для создания методики подготовки цифровых рентгеновских изображений семян к визуальному дешифрированию использовалась программная среда MATLAB. Представлены описание и примеры работы функций улучшения качества цифровых рентгеновских изображений семян, предшествующих визуальной расшифровке скрытых дефектов: нормализация фона, нормализация сигнала, распознавание образов, маркировка и преобразование областей интереса, отображение областей интереса. Обсуждается решение сходных задач по улучшению качества исходных цифровых изображений, в том числе рентгеновских в медицине. Представлены сведения о существующих методиках анализа цифровых рентгеновских изображений семян, их преимуществах и ограничениях. Обоснована значимость созданной методики для реализации разрабатываемого национального стандарта ГОСТ Р «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии» и проведения рентгенографических экспертиз партий семенного материала.

Ключевые слова: микрофокусная рентгенография семян, улучшение качества изображений, анализ изображений семян, качество семян.

TECHNIQUE OF DIGITAL X-RAY SEED IMAGES PREPARATION FOR VISUAL IMAGE INTERPRETATION

P. A. Shchukina, M. V. Arkhipov, L. P. Gusakova, N. S. Priyatkin
Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220
E-mail: prini@mail.ru

The paper discusses the main technical problems in obtaining digital X-ray images of seeds: spherical, nonlinear, geometric distortions, uninformative noise, artifacts, inhomogeneity of radiation absorption when passing through the studied object. The ways of their elimination are proposed and explained. The MATLAB software environment is used to create a technique for preparing digital X-ray images of seeds for visual interpretation. A description and examples of the functions operation for improving the quality of digital X-ray images of seeds preceding the visual interpretation of hidden defects are given (background correction, signal normalization, pattern recognition, marking and transformation of regions of interest, displaying regions of interest). The solutions of similar problems to improve the quality of initial digital images, including X-ray images in medicine, are discussed. Information on existing methods for analyzing digital X-ray images of seeds, their advantages and limitations is presented. The significance of the created technique for the implementation of the developed national standard GOST R «Agricultural Seeds. Methods of Digital X-ray» and X-ray examinations of seed lots is justified.

Key words: microfocus X-ray of seeds, image quality improvement, seed image analysis, seed quality.

ВВЕДЕНИЕ

В области промышленного семеноводства достаточно давно возникла необходимость использования опыта дефектоскопии при контроле качества семенного материала, особенно в связи с разработкой национального стандарта ГОСТ Р «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии». Несмотря на то, что автоматический анализ цифровых рентгеновских изображений имеет определенную перспективу и

применяется прежде всего для выявления невыполненности семян различных сельскохозяйственных культур (Gomes-Junior et al., 2012; Архипов и др., 2013; Silva et al., 2013), расшифровка (экспертиза) изображений для установления наличия и процентного содержания основных типов скрытых дефектов может быть выполнена экспертом по расшифровке рентгенограмм визуально. Данный метод является наиболее точным, однако требует высокой квалификации оператора-

расшифровщика. На сегодняшний день примерно 80% рентгенографических экспертиз семян, проводимых ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» и МИП ООО «Агрофизика» (Санкт-Петербург, www.agrofizika.biz), выполняется визуальным способом (Прияткин и др., 2020).

Метод мягколучевой рентгенографии зарекомендовал себя как надёжный, гибкий и деликатный метод изучения внутренних структур биологических объектов (Архипов, Потрахов, 2008). С развитием техники стало возможным достоверное объёмное сканирование объекта со значительным снижением дозы излучения. Например, при рентгене легких в «СМ-Клиника» используются следующие дозы излучения: 0,3 миллизиверта – при пленочном методе; 0,03 миллизиверта – при цифровом методе.

Помимо очевидной безопасности, цифровая рентгенография имеет ряд других преимуществ, в частности является весьма удобной для использования в качестве экспресс-методики оценки поврежденности внутренних структур семени. Семена как объекты исследования имеют достаточно малый размер (от 0,5 мм до 1,5 см), в связи с чем для изучения их внутреннего строения используются методики микрофокусной съемки, так как в противном случае внутренние органы и следы повреждений будут малоразличимы.

Однако даже при правильно подобранных режимах съемки и использовании плоскопанельных детекторов с высокой разрешающей способностью снимки могут получаться малоконтрастными, зашумлёнными и неоднородными. В таких случаях может помочь предобработка рентгеновского снимка – вычислительная мощность техники существенно увеличилась, а использование ЭВМ в настоящее время не представляет никаких трудностей.

Для оценки качества рентгенограммы как изображения будут важны контрастность снимка и чёткость его внутренних контуров. При проведении визуального анализа работа над данными параметрами может осуществляться в процессе обработки изображений, однако наиболее оптимальным вариантом является настройка аппаратуры, позволяющая достичь лучших результатов съемки.

При анализе и обработке любого сигнала необходимо обладать вводной информацией о том, как именно он был получен. В случае с рентгеновским снимком, полученным с помощью цифрового детектора, необходимо учитывать следующие аспекты:

1. Импульс рентгеновского излучения имеет сферический фронт (Клюев, 1992) с точки зрения распределения энергии, и поэтому изображение будет иметь сферическое искажение распределения яркости (рис. 1). Это может быть достаточно легко исправлено

при помощи программных методов — вычитания сферического искажения.

2. Детектор, на котором происходит регистрация рентгеновского излучения и преобразование входного сигнала в изображение, имеет свою область чувствительности, поэтому изображение будет иметь нелинейные искажения яркости при условии выхода за пределы технических ограничений прибора (рис. 2). Данная проблема может быть обнаружена, но не может быть исправлена с помощью методов программной обработки сигнала.

3. Детектор имеет ограничение разрешающей способности, в связи с чем изображение будет иметь некоторый уровень неинформативного шума (рис. 3). Для решения данной задачи хорошо показывают себя медианные фильтры.

4. Изображение, полученное с помощью метода микрофокусной съемки, будет иметь геометрическое сферическое искажение – объекты в центре фокуса изображения будут увеличены меньше, чем на его периферии (рис. 4). Данная проблема может быть решена с помощью пересчёта искажений, однако кроме самого снимка необходимы знания о фокусных расстояниях при рентген-съемке.

5. Детектор может иметь дефектные области, а потому на изображении могут присутствовать области, содержащие «артефакты», «царапины» и «битые пиксели», которые выглядят как яркостные искажения разной степени, вплоть до граничных значений яркостной матрицы (черные пятна, белая засветка). Для решения данной проблемы математиками разработан широкий спектр методик реставрации изображений (Старовойтов, Голуб, 2014).

6. Изображение реверсируется, так как человеческий глаз лучше различает светлые объекты на тёмном фоне, однако следует помнить, что коррекция яркости/контрастности снимка с помощью программных методов – это, в первую очередь, искажение сигнала, полученного вследствие физического эксперимента, поэтому настройка режимов непосредственно для съемки является более предпочтительной, чем корректировка параметров самого снимка.

7. Принцип получения рентгеновского снимка основан на неоднородном поглощении излучения при его прохождении через исследуемый объект по закону Бугера-Ламберта-Бера, который носит экспоненциальный характер. В связи с этим разница в яркости между «светлыми» и «тёмными» областями на изображении при разных режимах съемки будет различной (рис. 5). Разнокачественность снимков невозможно устранить при помощи программных методов, а потому при необходимости их дальнейшего сопоставления следует использовать единообразные режимы съемки.

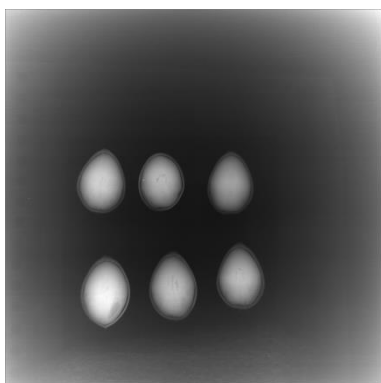


Рис. 1. Пример сферического искажения цифрового рентгеновского изображения семян *Ginkgo biloba*

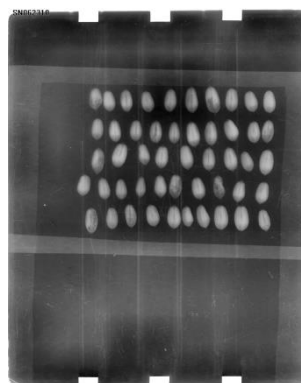


Рис. 2. Пример нелинейного искажения цифрового рентгеновского изображения семян *Triticum aestivum*

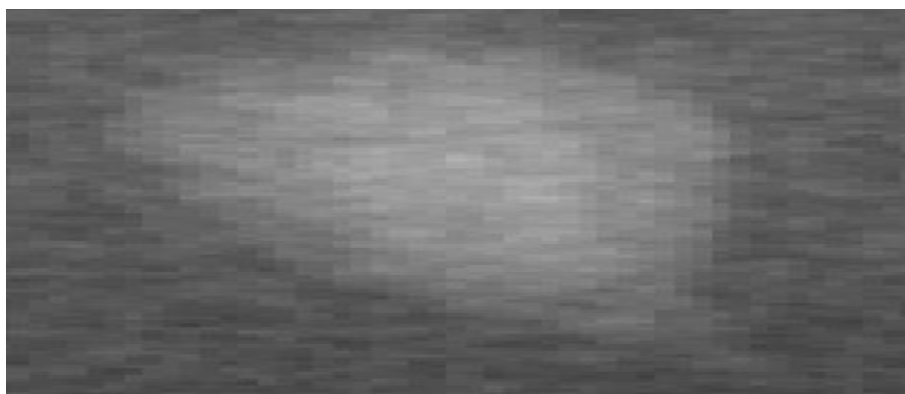


Рис. 3. Изображение семени *Metasequoia glyptostroboides* с повышенным уровнем неинформативного шума



Рис. 4. Пример геометрического сферического искажения цифрового рентгеновского изображения семян *Pinus nigra*.

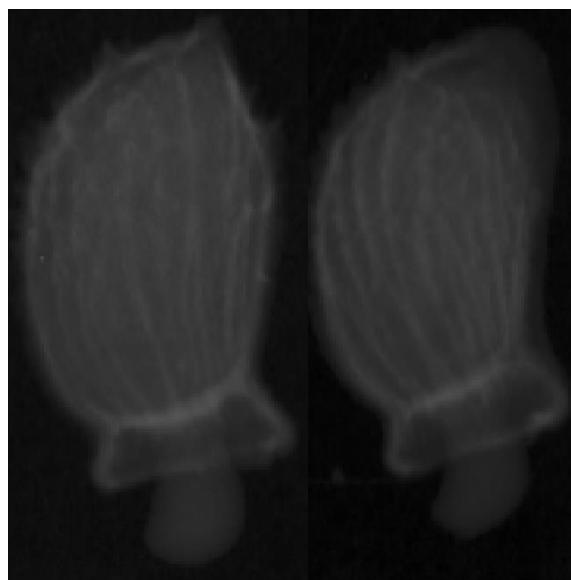


Рис. 5. Пример искажения вследствие неоднородности поглощения излучения при прохождении через исследуемый объект цифрового рентгеновского изображения семян *Borago officinalis*

Целью работы является создание методики программной обработки цифровых рентгеновских изображений семян и приведение объектов между сериями к некоторому унифицированному виду для удобства оценки с учётом некоторого стандарта их получения.

Для достижения цели работы потребовалось последовательно решить следующие задачи:

1. Нормализация фона цифровых рентгеновских изображений семян.

2. Нормализация сигнала цифровых рентгеновских изображений семян.

3. Распознавание образов на цифровых рентгеновских изображениях семян.

4. Маркировка и преобразование областей интереса цифровых рентгеновских изображений семян.

5. Отображение областей интереса цифровых рентгеновских изображений семян.

Задачи 1 и 2 являются действиями по улучшению читаемости изображения, задачи 3–5 – работой над представлением данных в удобной для анализа форме.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Для создания методики подготовки цифровых рентгеновских изображений семян к визуальному дешифрированию использовалась программная среда MATLAB (MathWorks Inc., 2000).

1. Нормализация фона.

Как было отмечено ранее, человеческий глаз лучше распознаёт светлый объект на тёмном фоне, в связи с чем изображение приводится именно к такому виду – черный фон, белый объект. Однако уровень яркости фона может быть различным от снимка к снимку вследствие технической невозможности поддержания единообразия условий съёмки. Контрастность снимка также может быть плохо различимой.

Решение проблемы неоднородности яркости фона достигается посредством простого приведения всех исследуемых снимков к единому уровню – к нулю относительных единиц яркости.

Для нахождения формулы поверхности искажений фона необходимо выполнить следующие операции:

1. Построить гистограмму изображений и найти пик, который позволит обнаружить фокусное пятно – самую тёмную область.

2. Найти центр тяжести пикселей "фокусного" пятна для определения его геометрического расположения.

3. Найти область диска с максимально возможным радиусом по координатам, определенным в п. 2., шириной не более 10-й доли от возможного радиуса. Построить гистограмму яркости – её максимум будет соответствовать яркости данной области.

4. Найти уравнение сферической поверхности, используя найденные точки, и вычесть полученные значения яркости из исходного изображения.

Таким образом, сферическое искажение на изображении будет устранено (рис. 6).

Малая контрастность является более сложной проблемой, так как при изменении относительных единиц яркости на самом изображении происходит деформация сигнала, что может создать трудности в случае, если с серией снимков работает несколько операторов-исследователей, поскольку из-за индивидуальных физиологических особенностей зрения каждый из них будет различать контрастные объекты по-разному. Однако данную проблему можно устранить. При условии неизменности параметров сигнала могут быть изменены параметры отображения сигнала, что позволит не потерять исходную информацию. Требования к контрастности могут быть взяты из ИСО 9241-125:2017, посвященных эргономике, – отношение яркости объекта к фону отличается примерно в два раза.

2. Нормализация сигнала.

Изображение может быть зашумлено, что может помешать сводному чтению сигнала. В подобном случае могут использоваться как довольно простые приёмы типа «медианного» фильтра, так и современные сверточные нейронные сети. Удачным готовым решением является DeepImagePrior – сверточная нейронная сеть, тренирующаяся на изображении, которое необходимо восстановить.

3. Распознавание образов.

На изображении с предварительно выровненным и нормализованным фоном легко обнаруживаются зоны интересов (объекты) с помощью гистограммы (рис. 7). Могут быть весьма полезны некоторые дополнительные операции над маской изображения (работа над морфологией: случайные «дыры» в объектах, слипшиеся или разделённые объекты, неполноценные объекты, выходящие за границу съёмки, и т. д.).

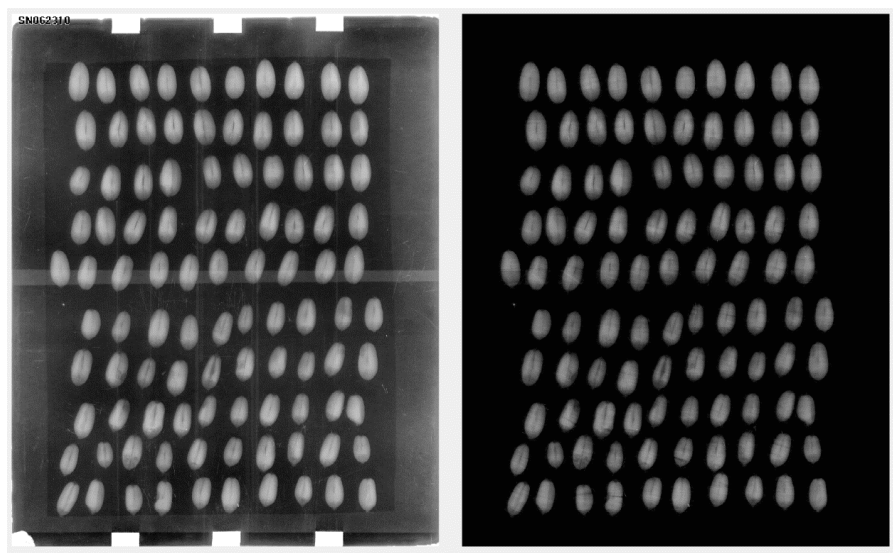


Рис. 6. Результат работы функции вычитания сферического искажения из цифрового рентгеновского изображения семян *Triticum aestivum*

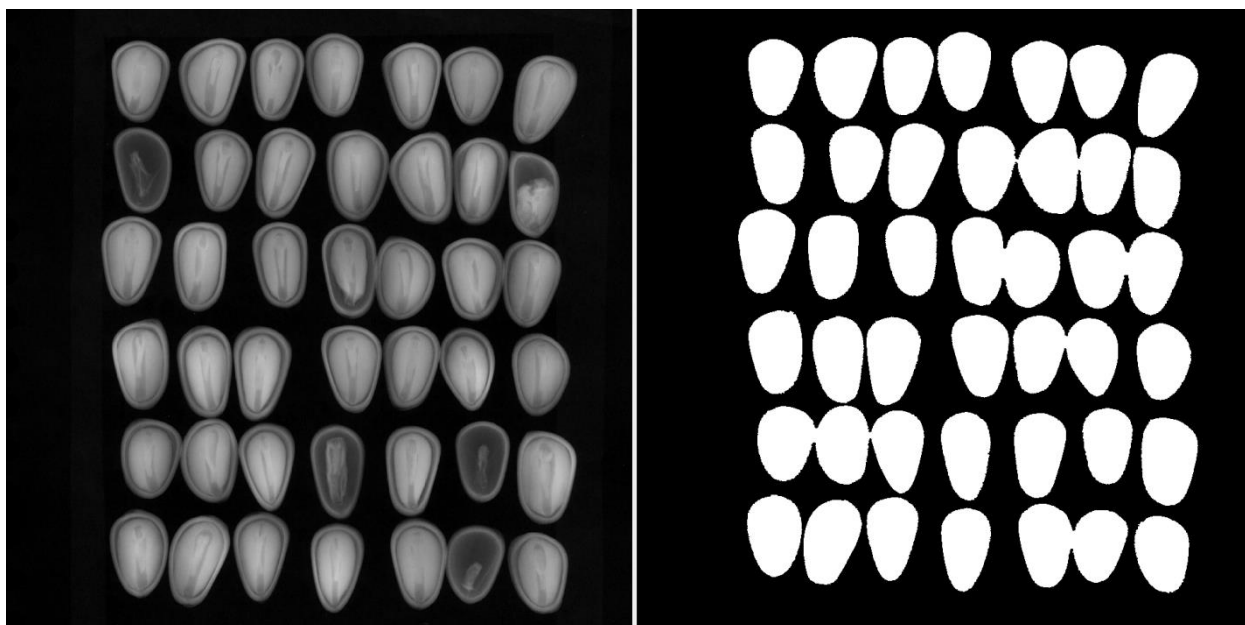


Рис. 7. Результат работы функции по распознаванию объектов интереса на цифровом рентгеновском изображении семян *Pinus pumila*

На данном этапе от оператора требуется аккуратность, однако он также может быть выполнен в полуавтоматическом режиме – поиск граничных условий и создание черновой маски со стандартными требованиями к внешнему виду искомым объектам могут быть осуществлены автоматически.

4. Маркировка и преобразование областей интереса.

Человеческому сознанию крайне сложно оставаться объективным при оценке, проводимой с помощью методов визуального анализа изображений. Для уменьшения влияния выборки на решение оператора можно прибегнуть к отдельному рассмотрению каждой конкретной области интереса. Однако методы рентгенографического анализа достаточно часто относят к группе методик, изучающих конкретную выборку. Поэтому крайне важно сохранять маркировки объектов.

Семена на «карточках» выкладываются рядами. Согласно ГОСТ 12038-84, для учета скрытой дефектности индивидуальных семян и её сопряженного учета с их посевными качествами необходимо сохранять сведения о порядковом номере семени. Данная задача достаточно легко решается с помощью информации об их распределении и центрах тяжести. При условии, что лаборант раскладывал семена рядами, их различия по высоте в ряду будут намного меньше, чем между рядами.

Как для удобства оператора, так и для возможной автоматизации процесса расшифровки рентгенограмм семена могут быть однородно ориентированы в пространстве с помощью анализа оси инерции (рис. 8).

5. Отображение областей интереса.

Одной из самых важных задач при анализе данных является их удобное отображение. Как было отмечено выше, для хорошего различения они должны быть контрастными, а для наиболее объективной оценки — максимально одинаково представленными, предпочтительно поодиночке.

Некоторые средства отображения изображений с возможностью регулирования контрастности могут существенно упростить работу над расшифровкой. Однако даже простое склеивание выровненных по яркости в ряды областей интереса может быть более удобным для визуального анализа по сравнению с исходным снимком (рис. 9).

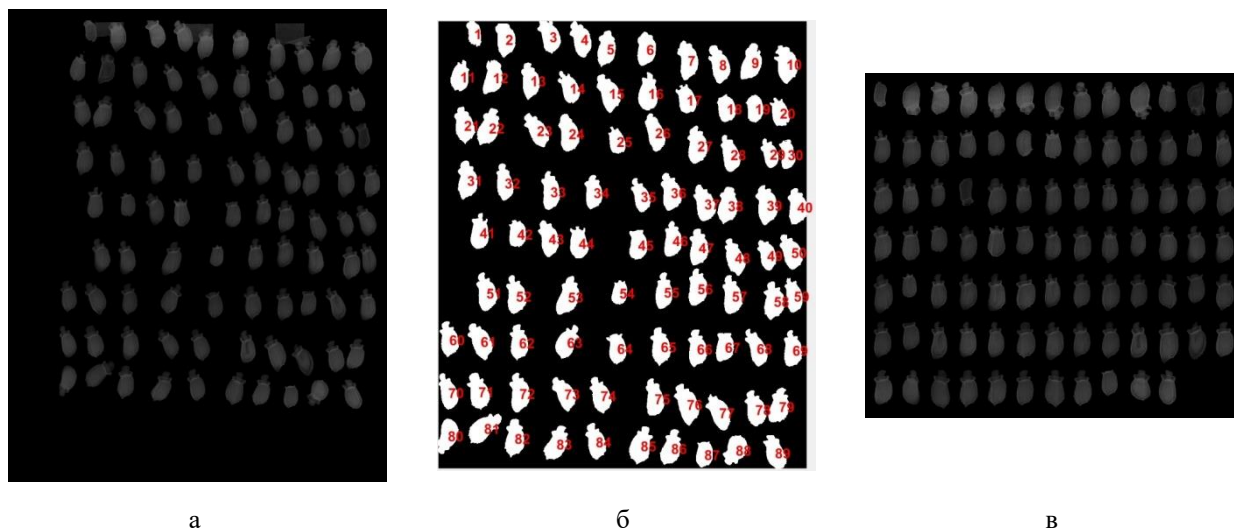


Рис. 8. Результат работы функции сегментации подготовленного изображения и маркировка распознанных объектов: а – ретушированное изображение; б – изображение с маркировкой распознанных объектов; и – изображение нормально ориентированных объектов

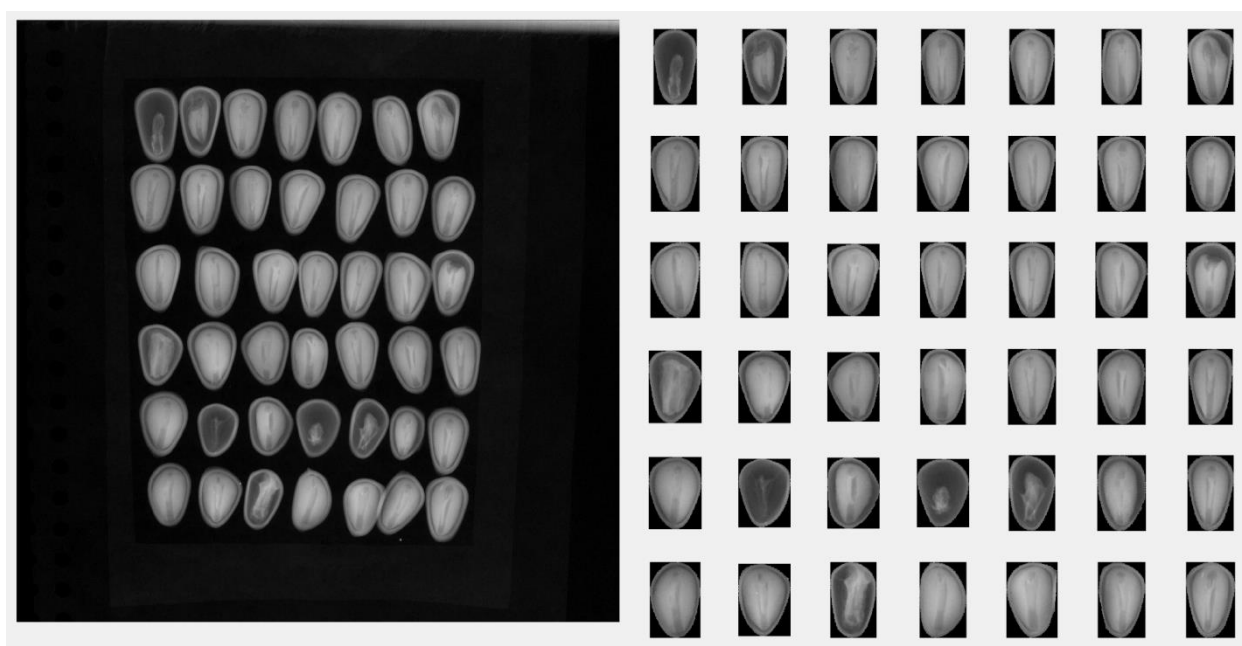


Рис. 9. Результат работы функции склеивания выровненных по яркости и расположенных в ряды областей интереса на примере изображения семян *Pinus pumila*

ОБСУЖДЕНИЕ МЕТОДИКИ

В настоящее время отсутствует единая база для работы над изображениями – для каждой прикладной задачи разрабатывается собственный комплекс решений. Цифровой рентгеновский снимок – это результат физического опыта, который будет оцениваться визуально. Поэтому единственным

значимым ограничением будет его читаемость при работе и любых дальнейших преобразованиях.

Подготовка результатов опыта перед их оценкой является крайне важной задачей. Однозначные рекомендации по работе с цифровым рентгеновским снимком перед его расшифровкой отсутствуют, что вызывает недоумение, поскольку любой сигнал как результат физического опыта не

застрахован от случайных и инструментальных ошибок, влияния среды, а также других неучтенных факторов. Обычно результаты физических опытов необходимо проверить на адекватность и корректность заданных условий, прежде чем можно будет приступить к их интерпретации. При работе со снимком от оператора требуются личный опыт и дополнительная квалификация для учета влияния условий эксперимента и различных помех на полученные результаты.

Часто возникают ситуации, когда визуально определить различия между образами затруднительно. Крайне важной, а потому и тщательно изученной, является проблема распознавания текста. Для ее решения необходима высокая точность, так как образы в данном случае малоотличимы друг от друга, особенно если текст является рукописным. Весьма часто изображения, на которых требуется распознать текст, имеют ряд дефектов, являются малоконтрастными или поврежденным тем или иным способом. Для решения данной проблемы предпринимается ряд действий по реставрации изображений. Стандартный алгоритм: коррекция яркости, повышение резкости и отделение фона от изображения (Шабанов, 2017). Указанные операции можно применить также к рентгеновскому снимку.

Даже при контрастной съемке могут возникнуть некоторые сложности в процессе расшифровки. При работе оператора может быть целесообразным выделение областей интереса. В целом расшифровка флюорограммы требует высокой квалификации специалиста для получения достоверных результатов. В данном случае весьма полезной может быть дополнительная разметка. Алгоритмы обычно либо крайне просты (порог для приведения изображения к бинарному виду), либо весьма сложны (обученная нейронная сеть по поиску областей интереса). Например, задача различия лёгочных болезней и коронавируса на флюорограмме является задачей по сегментации изображения (Abdulmunem, 2020). Авторы статьи полагают, что данное упрощение визуальной информации для оператора приемлемо также при определении дефектов семян растений.

В некоторых случаях даже хорошо различимые метки (особенности) довольно сложно интерпретировать. Возникает вопрос о классификации объектов. Данная проблема становится особенно острой, когда отсутствует возможность повторного проведения эксперимента или моделирования ресурсов. Например, в археологии, в частности в разделе ботаника, анализ снимков может быть применен для того, чтобы установить, что именно видит оператор-исследователь и является ли данный образец представителем чего-либо уже известного ему (Grilloetal, 2016).

В данном случае остро встает проблема реконструкции образов – объекты часто являются неполными. При этом применяются методы реконструкции изображений, в частности математической морфологии (Leietal, 2019).

Как следует из литературных данных (Filhoetal, 2010; dos Santos Borgesetal, 2019), в настоящее время широко распространена автоматизация процессов

оценки изображений для принятия решений о качестве семенного материала. Наиболее оптимальными являются алгоритмы, предназначенные для работы с "плоскими" семенами, например томата.

Существуют также полностью автономные программы для работы рентгеновского сепаратора семян отдельных видов сельскохозяйственных культур (Bruggink, 2017).

Таким образом, можно утверждать, что описанные методы предварительной обработки изображений, в том числе рентгеновских, широко применяются в других областях – прежде всего в медицине. Необходимо подчеркнуть, что разработанная авторами методика подготовки цифровых рентгеновских изображений семян к визуальному дешифрированию является инструментом-приложением для ручной экспертизы семян, выполняемой оператором-расшифровщиком. Данная методика станет универсальной основой для реализации национального стандарта ГОСТ Р «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии». Существующие в настоящее время программные методики и продукты, предназначенные для автоматического распознавания дефектов семян, в основном относятся к семеноведению или к промышленной сортировке семян, которая является задачей, отличной от экспертизы исследуемых партий семян на предмет их скрытой дефектности. Единственным программным продуктом, который на данный момент позволяет проводить экспертизу по выявлению дефектов семенного материала, является «Агротест-Зерно» (Желудков и др., 2018), однако он способен выявлять не все типы визуально наблюдаемых дефектов и работает с цифровыми рентгеновскими изображениями зерен только некоторых злаковых культур, преимущественно товарного назначения.

ВЫВОДЫ

Таким образом, подготовка и предобработка цифровых рентгеновских изображений могут решить следующие задачи, необходимые для осуществления рентгеновской экспертизы семян:

1. Повышение эффективности работы специалиста-рентгенолога за счет удобства визуализации исходных рентгенограмм, экономии его рабочего времени и снижения числа случайных ошибок при визуальном анализе рентгенограмм.
2. Подготовка изображений для их автоматического анализа с использованием различных компьютерных программ.
3. Представление заказчику полученных цифровых рентгеновских изображений в презентабельном и удобном для просмотра виде (без артефактов и дефектов съемки).

Список литературы

- Архипов М. В., Потрахов Н. Н. Микрофокусная рентгенография растений. СПб.: Технолит, 2008. 194 с.
- Архипов М. В., Прияткин Н. С., Бондаренко А. С. Применение методов мягколучевой рентгенографии и газоразрядной визуализации для оценки качества семян ели европейской // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2013. № 31. С. 62-66.
- ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести.
- ГОСТ 12039-82. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения жизнеспособности.
- ГОСТ 13056.8-97. Семена деревьев и кустарников. Метод определения доброкачественности.
- ГОСТ 28666.1-90 (ИСО 6639/1-86). Зерновые и бобовые. Определение скрытой зараженности насекомыми.
- Желудков А. Г., Белецкий С. Л., Потрахов Н. Н. Автоматизация рентгенографического метода анализа качества семян и товарного зерна злаковых культур // Хранение и переработка сельхозсырья. 2018. № 1. С. 65–70.
- ИСО 9241-125:2017. Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 125. Руководство по визуальному представлению информации.
- Мусаев Ф. Б., Потрахов Н. Н., Архипов М. В. Рентгенография семян овощных культур. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 207 с.
- Мусаев Ф. Б., Потрахов Н. Н., Потрахов Е. Н. Применение микрофокусной рентгенографии для анализа качества семян овощных растений // Лучевая диагностика, лучевая терапия. 2015. № 2 (38). С. 25–27.
- Потрахов Н. Н., Грязнов А.Ю., Жамова К.К. Микрофокусная рентгенография в медицине: физико-технические особенности и современные средства рентгенодиагностики // Медицинские технологии. 2015. № 5(41). С. 55–63.
- Прияткин Н. С., Архипов М. В., Потрахов Н. Н. Рентгенографическая экспертиза семян // Сельскохозяйственные вести. 2020. № 1. С. 42–43.
- Рентгентехника: Справочник / Под общ. ред. В. В. Ключева. 2-е изд., перераб. и доп. В 2-х кн. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.
- Старовойтов В. В., Голуб Ю. И. Цифровые изображения: от получения до обработки. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. 202 с.
- Шабанов А. В. Опыт цифровой реставрации рукописных книг в ГПНТБ СО РАН // Библиосфера. 2017. № 2. С. 101–104.
- Abdulmunem A., Hayder M., Faris M. Coronavirus X-ray Images Segmentation. April 2020. Электронный ресурс: https://www.researchgate.net/publication/340938815_Coronavirus_X-ray_Images_Segmentation.
- Bruggink H., van Duijn B. X-ray Based Seed Analysis // Seed Testing International, 2017, v 53, pp. 45–50.
- Dos Santos Borges S. R., da Silva P. P., Araújo F. S., de Jesus Souza F. F., Nascimento W. M. Tomato seed image analysis during the maturation // Journal of Seed Science, 2019, v. 41, no. 1, pp. 022–031. DOI: 10.1590/2317-1545v41n1191888.
- Filho J. M., Gomes junior F. G., Bennett M. A., Wells A. A., Stieve S. Using tomato analyzer software to determine embryo size in x-rayed seeds // Revista Brasileira de Sementes, 2010, v. 32, no. 2. P. 146–153. DOI: 10.1590/S0101-31222010000200018.
- Gomes-Junior F. G.; Yagushi J. T.; Belini U. L.; Cicero S. M.; Tomazello-Filho M. X-ray densitometry to assess internal seed morphology and quality // Seed Science and Technology, 2012, v. 40, no. 1, pp. 102–107.
- Grillo O., Uccesu M., Orru M., Sarigu M., Venora G., Bacchetta G. Could seed image analysis be helpful in the archaeobotanical studies? 17th Conference of the International Work Group for Palaeoethnobotany Paris, France Muséum national d'Histoire naturelle, Jardin des Plantes July 4-9, 2016, pp.15–16.
- Image Processing Toolbox User's Guide 1993 - 2000 by The MathWorks, Inc.
- Lei T., Xiaohong L., Tongliang L., Liu Sh., Meng H., Nandi A. K., Fellow. Adaptive Morphological Reconstruction for Seeded Image Segmentation // IEEE Transactions on Image Processing, 2019, v. 28, no. 11, pp. 1–14. DOI: 10.1109/TIP.2019.2920514.
- Richard Szeliski. Computer Vision: Algorithms and Applications – Microsoft Research, 2010. 969 p. (<http://szeliski.org/Book/>).
- Silva V. N., Cicero S. M., Bennett M. Associations between X-ray visualised internal tomato seed morphology and germination // Seed Science and Technology, 2013, v. 41, no. 2, pp. 225–234.

References

- Arkhipov M. V., Potrakhov N. N. *Mikrofokussnaya rentgenografiya rasteniy* [Microfocus radiography of plants]. Saint-Petersburg: Publishing house Tekhnolit, 2008, 194 p.
- Arkhipov M. V., Priyatkin N. S., Bondarenko A. S. *Primeneniye metodov myagkoluchevoy rentgenografii i gazorazryadnoy vizualizatsii dlya otsenki kachestva semyan yeli yevropeyskoy* [The use of methods of soft-beam radiography and gas-discharge visualization to assess the quality of seeds of European spruce] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 31, pp. 62–66.
- GOST 12038-84. *Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti* [Seeds of crops. Germination methods].

- GOST 12039-82. Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya zhiznesposobnosti [Seeds of crops. Viability methods].
- GOST 13056.8-97. Semena derev'yev i kustarnikov. Metod opredeleniya dobrokachestvennosti [Seeds of trees and shrubs. Benchmarking method].
- GOST 28666.1-90 (ISO 6639/1-86). Zernovyye i bobovyye. Opredeleniye skrytoy zarazhennosti nasekomymi [Cereals and legumes. Determination of latent infection by insects].
- Zheludkov A. G., Beletskiy S. L., Potrakhov N. N. Avtomatizatsiya rentgenograficheskogo metoda analiza kachestva semyan i tovarnogo zerna zlakovykh kul'tur [Automation of the X-ray method for analyzing the quality of seeds and marketable grain of cereal crops] // *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya*, 2018, no. 1, pp. 65–70.
- ISO 9241-125:2017. Ergonomika vzaimodeystviya chelovek-sistema. Chast' 125. Rukovodstvo po vizual'nomu predstavleniyu informatsii [Ergonomics of human-system interaction. Part 125. Guidance on the visual presentation of information].
- Musayev F. B., Potrakhov N. N., Arkhipov M. V. *Rentgenografiya semyan ovoshchnykh kul'tur* [Radiography of vegetable seeds]. Saint-Petersburg: Publishing house «LETI», 2016, 207 p.
- Musayev F. B., Potrakhov N. N., Potrakhov E. N. Primeneniye mikrofokusnoy rentgenografii dlya analiza kachestva semyan ovoshchnykh rasteniy [The use of microfocus radiography to analyze the quality of seeds of vegetable plants] // *Luchevaya diagnostika, luchevaya terapiya*, 2015, no. 2 (38), pp. 25–27.
- Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Zhamova K. K. Mikrofokusnaya rentgenografiya v meditsine: fiziko-tekhnicheskiye osobennosti i sovremennyye sredstva rentgenodagnostiki [Microfocus radiography in medicine: physical and technical features and modern means of X-ray diagnostics] // *Meditsinskiye tekhnologii*, 2015, no. 5 (41), pp. 55–63.
- Priyatkin N. S., Arkhipov M. V., Potrakhov N. N. Rentgenograficheskaya ekspertiza semyan [X-ray examination of seeds] // *Sel'skokhozyaystvennyye vesti*, 2020, no. 1, pp. 42–43.
- Rentgenotekhnika: Spravochnik* [X-ray: Reference] / Pod obshch. red. V. V. Klyuyeva. 2-ye izd., pererab. i dop. V 2-kh kn. Kn. 1. Moscow: Publishing house Mashinostroyeniye, 1992, 480 p.
- Starovoytov V. V., Golub Yu. I. *Tsifrovyye izobrazheniya: ot polucheniya do obrabotki* [Digital imaging: from receipt to processing]. Minsk: Publishing house OIPI NAN Belarusi, 2014, 202 p.
- Shabanov A. V. Opyt tsifrovoy restavratsii rukopisnykh knig v GPNTB SO RAN [The experience of digital restoration of manuscript books in the SPSL SB RAS] // *Bibliosfera*, 2017, no. 2, pp. 101–104.
- Abdulmunem A., Hayder M., Faris M. Coronavirus X-ray Images Segmentation. April 2020. Электронный pecыпc: https://www.researchgate.net/publication/340938815_Coronavirus_X-ray_Images_Segmentation.
- Bruggink H., van Duijn B. X-ray Based Seed Analysis // *Seed Testing International*, 2017, v. 53, pp. 45–50.
- Dos Santos Borges S. R., da Silva P. P., Araújo F. S., de Jesus Souza F. F., Nascimento W. M. Tomato seed image analysis during the maturation // *Journal of Seed Science*, 2019, v. 41, no. 1, pp. 022–031. DOI: 10.1590/2317-1545v41n1191888.
- Filho J. M. Gomes junior F. G., Bennett M. A. Wells A. A., Stieve S. Using tomato analyzer software to determine embryo size in x-rayed seeds // *Revista Brasileira de Sementes*, 2010, v. 32, no. 2. P. 146–153. DOI: 10.1590/S0101-31222010000200018.
- Gomes-Junior F. G.; Yagushi J. T.; Belini U. L.; Cicero S. M.; Tomazello-Filho M. X-ray densitometry to assess internal seed morphology and quality // *Seed Science and Technology*, 2012, v. 40, no. 1, pp. 102–107.
- Grillo O., Uccesu M., Orru M., Sarigu M., Venora G., Bacchetta G. Could seed image analysis be helpful in the archaeobotanical studies? 17th Conference of the International Work Group for Palaeoethnobotany Paris, France Muséum national d'Histoire naturelle, Jardin des Plantes July 4-9, 2016, pp. 15–16.
- Image Processing Toolbox User's Guide 1993 - 2000 by The MathWorks, Inc.
- Lei T., Xiaohong L., Tongliang L., Liu Sh., Meng H., Nandi A. K., Fellow. Adaptive Morphological Reconstruction for Seeded Image Segmentation // *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, v. 28, no. 11, pp. 1–14. DOI: 10.1109/TIP.2019.2920514.
- Richard Szeliski. *Computer Vision: Algorithms and Applications* – Microsoft Research, 2010. 969 p. (<http://szeliski.org/Book/>).
- Silva V. N., Cicero S. M., Bennett M. Associations between X-ray visualised internal tomato seed morphology and germination // *Seed Science and Technology*, 2013, v. 41, no. 2, pp. 225–234.