

УДК 004.932

DOI: 10.15827/0236-235X.116.165-170

Дата подачи статьи: 14.06.16

2016. Т. 29. № 4. С. 165–170

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор, korobeynikov_a_g@mail.ru;

В.И. Поляков, к.т.н., доцент, v_i_polyakov@mail.ru;

М.Е. Федосовский, к.т.н., профессор, stts@diakont.com;

С.А. Алексанин, аспирант, stts@diakont.com

*(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО),
Кронверкский просп., 49, г. Санкт-Петербург, 197101, Россия)*

Методы, базирующиеся на анализе рассеяния магнитных полей возле дефектов после намагничивания изделий, позволяют установить наличие в поверхностных слоях стальных деталей дефектов, например трещин. В областях, где нарушена сплошность, будет происходить изменение магнитного потока. Одним из наиболее известных методов магнитной дефектоскопии является метод магнитного порошка: на поверхность намагниченной детали наносят магнитный порошок (сухой метод) или магнитную суспензию (мокрый метод). При использовании люминесцентных порошков или суспензий на изображениях исследуемых деталей дефекты видны значительно лучше, поэтому появляется возможность автоматизированной обработки таких изображений. В работе представлена автоматизированная процедура выбора методов обработки изображений, на которых присутствуют дефекты. На первом этапе выбранными методами производится обработка изображения с целью улучшения его качества. В основном это методы фильтрации. Затем в автоматизированном режиме определяются границы всех объектов на изображении. На следующем этапе выполняется морфологическая обработка изображения. На заключительном этапе, после вычисления компоненты связности и диаметров объектов, делается вывод о наличии дефектов в изделии. Программная реализация данной процедуры осуществляется в системе MATLAB. Приведен пример обработки фотографии приваренного к трубе фланца, обработанного люминесцентной суспензией Magnaglo 14HF, создавшей люминесцентный зеленый индикаторный рисунок, наблюдаемый в ультрафиолетовом свете при длине волны 365 нм. Обозначены направления и названы методы, которые можно включить в процедуру для ее улучшения.

Ключевые слова: магнитная дефектоскопия, обработка изображений, улучшение изображений, морфологическая обработка изображений.

При решении задачи поиска дефектов в поверхностных слоях стальных деталей достаточно часто применяют методы, базирующиеся на анализе рассеяния магнитных полей возле дефектов после намагничивания этих изделий [1]. В локальной области, где нарушена сплошность, происходит изменение магнитного потока. Картина распределения магнитного поля будет определяться глубиной залегания дефекта, его величиной и формой. Например, у поверхностных трещин, ориентированных перпендикулярно магнитному потоку, наблюдается резко выраженное рассеяние магнитного поля. А у дефектов, ориентированных вдоль магнитного потока, поля рассеяния практически не наблюдаются [2].

Одним из наиболее известных методов магнитной дефектоскопии является метод магнитного порошка (ISO 9934-1:2001): на поверхность намагниченной детали высыпают магнитный порошок (сухой метод) или наносят магнитную суспензию (мокрый метод) [3]; магнитные частицы порошка или суспензии, попавшие в зоны магнитных полей рассеяния, осадут на поверхности детали в области нахождения дефектов.

При использовании магнитной дефектоскопии основным намагничиванием является циркулярное. Продольное намагничивание применяют обычно тогда, когда предполагается, что в исследуемом изделии дефекты строго поперечные, или ис-

пользование циркулярного намагничивания неприемлемо [4].

При использовании люминесцентных порошков или суспензий на изображениях исследуемых деталей дефекты видны значительно лучше [2], поэтому появляется возможность автоматизированной обработки таких изображений [5, 6]. В данной работе представлена автоматизированная процедура выбора методов обработки изображений с целью обнаружения дефектов.

Выбор метода улучшения изображения

Решение задачи автоматизированного выбора методов обработки изображений начинается с ввода цифровой фотографии исследуемой детали [7, 8]. В настоящее время обычно используют цветные фото [9].

Изображение принято определять через функцию $f(x, y)$, где x и y являются пространственными (плоскостными) координатами, а амплитуду f для каждой пары координат x и y называют интенсивностью или яркостью изображения в точке с этими координатами. Словосочетание *уровень серого* часто используют для обозначения яркости монохромного изображения. Цветные изображения формируются комбинацией нескольких монохромных изображений. Например, в цветовой системе RGB цветное изображение строится из трех от-

дельных монохромных компонент (красной, зеленой и синей). По этой причине многие методы и приемы, разработанные для монохромных изображений, могут быть распространены на цветные изображения путем последовательной обработки трех монохромных компонент.

В качестве примера изображения в данной работе будет обрабатываться фотография приваренного к трубе фланца (рис. 1). Изделие было обработано люминесцентной суспензией Magnaglo 14HF, создавшей люминесцентный зеленый индикаторный рисунок, который наблюдается в ультрафиолетовом свете при длине волны 365 нм.



Рис. 1. Исходная фотография

Fig. 1. The original photo

После загрузки изображения необходимо принять решение об улучшении его качества [9]. Это связано с тем, что надежная идентификация дефектов напрямую зависит от качества анализируемого изображения [10]. Низкое качество может привести к неправильной идентификации или к недопустимому определению характеристик дефектов [11]. В связи с этим надежное качество улучшения по-

добных изображений является важной задачей, которую необходимо решать в условиях слабой контрастности и низкой резкости изображений [12].

Общей теории улучшения изображений не существует. Если изображение обрабатывается с целью визуальной интерпретации, то оценку работы конкретного метода дает в конечном счете оператор-исследователь. Методы улучшения настолько разнообразны и используют так много различных подходов к обработке изображения, что трудно собрать осмысленную совокупность подходящих для улучшения методов в одной статье, не проводя отдельное обширное исследование [13–16].

Достаточно часто для улучшения изображений используют фильтрацию. При этом под этим термином наравне с удалением или компенсацией шумов и помех понимается и прямое получение из изображения информации о характеристиках локально неоднородных объектов [17].

Необходимо учитывать, что применение методов цифровой обработки изображений (ЦОИ) для задачи улучшения изображений достаточно часто дает искажение информации об объектах, присутствующих на изображении. Например, следствием повышения контраста и усиления краев достаточно часто является искажение формы и размера дефектоскопического объекта, что крайне нежелательно.

Один из возможных вариантов решения этой проблемы состоит в применении не методов ЦОИ для улучшения изображений, а методов фильтрации полезного сигнала. Но в этом случае под полезным сигналом следует понимать изображения дефектов. Информация от дефектов может быть интерпретирована как локальные неоднородности двумерного конечного нестационарного стохастического сигнала. В этом случае можно решать задачу фильтрации локальных неоднородностей изображений на фоне помех [18].

На рисунке 2 представлена схема автоматизированного выбора алгоритма улучшения изображения.

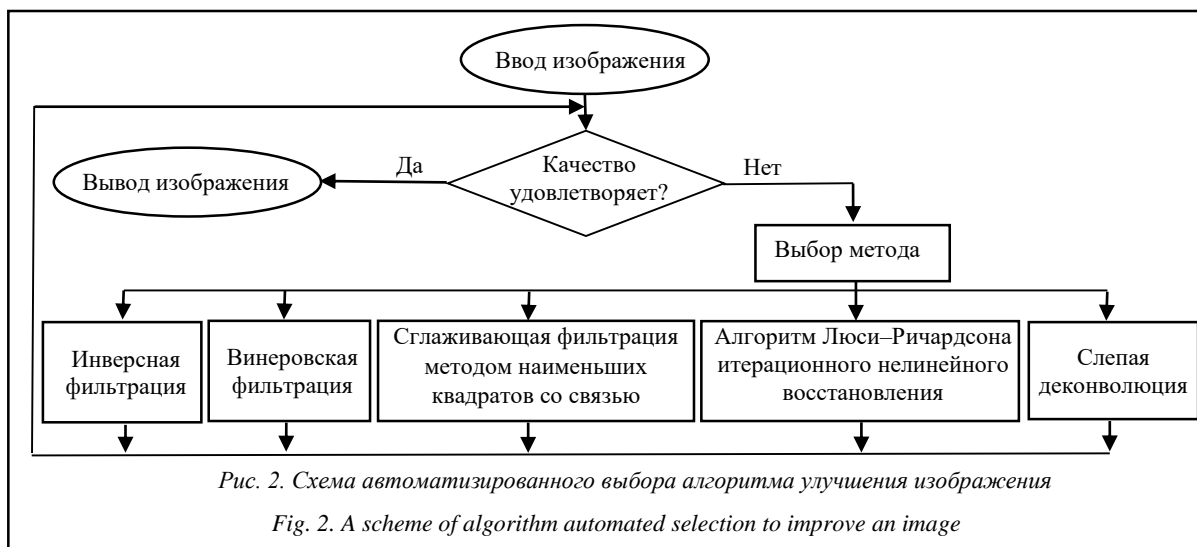


Рис. 2. Схема автоматизированного выбора алгоритма улучшения изображения

Fig. 2. A scheme of algorithm automated selection to improve an image

Как видно из рисунка, в данной методике реализованы следующие методы: инверсная фильтрация, винеровская фильтрация, сглаживающая фильтрация методом наименьших квадратов со связью, алгоритм Люси–Ричардсона итерационного нелинейного восстановления, слепая деконволюция.

Можно отметить, что в последнее время методы слепой деконволюции приобретают все большую популярность.

Для рассматриваемого примера наиболее предпочтительной, на взгляд авторов, оказалась обработка изображения методом Люси–Ричардсона (рис. 3) [19].

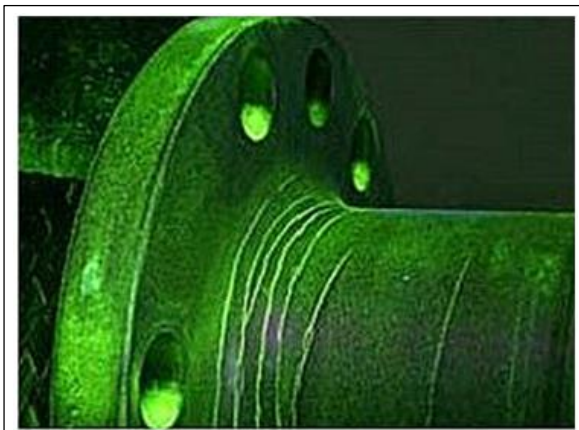


Рис. 3. Изображение, обработанное методом Люси–Ричардсона

Fig. 3. The image processed by Lucy–Richardson

Выделение границ объектов на изображении

Задача выделения границ объектов при ЦОИ возникает достаточно часто, например, выделение границ у дефектов. Дело в том, что многие методы распознавания изображений базируются на определении краев. Это связано с тем, что анализ на краях малочувствителен к общей освещенности. Обнаружение краев выделяет контраст (градиент). По определению, контраст – разная яркость. А ввиду того, что контраст между объектами и задним фоном происходит на границах, это обстоятельство и лежит в основе выделения границы объектов на изображении. Можно отметить, что и человеческое зрение выделяет границы объектов таким же образом.

Существует достаточно много математических методов выделения границ, но все они базируются на операции дифференцирования (в непрерывном случае) или замене конечными разностями в дискретном случае. Кроме того, практически все методы можно разделить на два семейства, которые базируются на поиске максимумов или нулей.

Те методы, которые базируются на поиске максимумов, определяют границы при помощи вычис-

ления силы края, например, вычисление значений первой производной. После этого производится поиск локальных максимумов силы края с использованием информации о предполагаемом направлении границы, которое достаточно часто перпендикулярно вектору градиента.

Так как интенсивность изображения задается функцией от двух переменных $f(x, y)$, ее градиент показывает направление максимального изменения интенсивности и вычисляется следующим обра-

$$\text{зом: } \nabla f = \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right].$$

Направление градиента (угол) вычисляют по формуле

$$\theta(x, y) = \arctan \left(\frac{\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}}{\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}} \right) = \arctan \left(\frac{\nabla f_y}{\nabla f_x} \right).$$

Сила края задается длиной градиента:

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}.$$

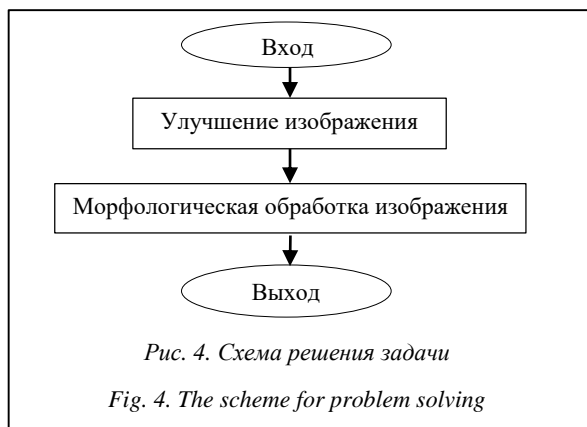
С помощью методов поиска нулей вычисляются пересечение оси абсцисс с выражением для второй производной. Достаточно часто это нули лапласиана или нули нелинейного дифференциального выражения.

Начальным шагом при решении задачи выделения границ достаточно часто служит сглаживание изображения, обычно это фильтр Гаусса.

Методы выделения границ различаются используемыми фильтрами сглаживания и способами расчета силы края. Большинство методов выделения границ базируются на вычислениях градиента изображения, все они различаются по типу применяемых фильтров, которые служат для вычисления градиентов в направлениях x и y .

Обозначенную проблему можно решать при помощи алгоритмов выделения контуров. Наиболее часто применяются методы Собеля, Превитта и Робертса, использующие базовое свойство сигнала яркости – разрывность. Самый общий алгоритм нахождения разрывов состоит в использовании скользящей маски, которую также называют фильтром, окном, ядром или шаблоном. По сути маска – это квадратная матрица, которая поставлена в соответствие заданному множеству пикселей в исходном изображении. Элемент матрицы называют коэффициентом. Математические преобразования для локальных областей изображения с использованием этой матрицы называют пространственной фильтрацией, или просто фильтрацией.

Процесс пространственной фильтрации базируется на линейном перемещении маски фильтра от одного пикселя изображения к другому – в каждом месте (x, y) отклик фильтра рассчитывается с учетом заранее определенных зависимостей. Для

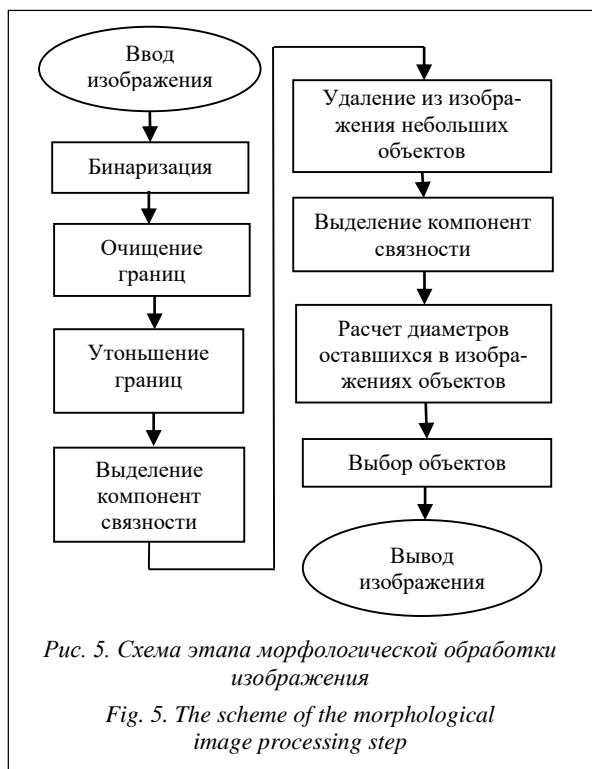


случая линейной пространственной фильтрации отклик задают при помощи суммы произведения коэффициентов фильтра на соответствующие значения пикселей в области, покрытой маской фильтра.

В задаче обнаружения перепадов яркости используют дискретные аналоги производных первого и второго порядков.

Морфологическая обработка изображений

После получения изображения удовлетворительного для исследователя качества проводится морфологическая обработка этого изображения. Такая обработка нужна для извлечения определенных компонентов изображения, другими словами, для обнаружения дефектов, то есть для решения поставленной задачи. На рисунке 4 в виде



схемы представлен процесс решения задачи, а на рисунке 5 – этап морфологической обработки изображения.

Продемонстрируем работу этого этапа на обработке изображения, приведенного на рисунке 3.

Для начала необходимо провести бинаризацию изображения, то есть значения пикселей изображения приравнять к 1 или 0 (рис. 6). При помощи морфологической реконструкции очистим изображение от объектов, соприкасающихся с границей (рис. 7), и произведем утоньшение границ объектов на изображении. Результат представлен на рисунке 8.



Рис. 6. Бинаризация изображения

Fig. 6. Image binarization

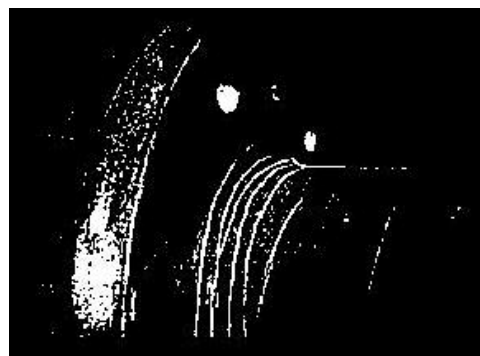


Рис. 7. Результат морфологической реконструкции

Fig. 7. The result of morphological reconstruction

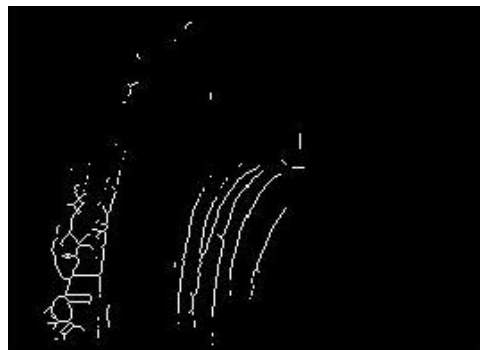


Рис. 8. Утоньшение границ изображения

Fig. 8. Thinning of image borders

Далее на полученном изображении выделим компоненты связности. На рисунке 8 имеются 56 компонент связности. Это означает, что на изображении присутствуют 56 объектов. При помощи операции морфологического замыкания с использованием компонент связности на изображении удалим небольшие объекты. Результат представлен на рисунке 9.

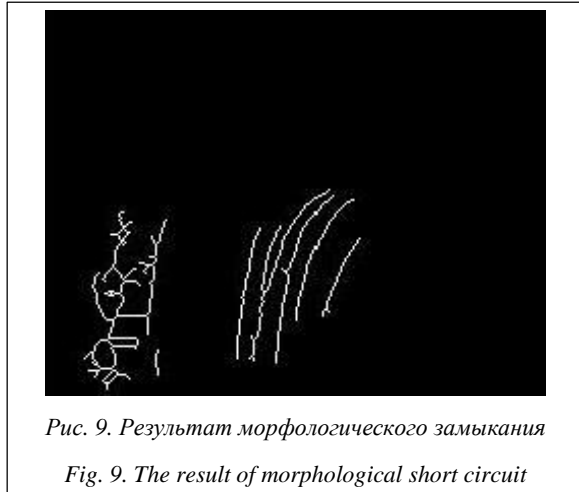


Рис. 9. Результат морфологического замыкания

Fig. 9. The result of morphological short circuit

Для полученного изображения определим компоненты связности. Их осталось семь. Используя эти данные, рассчитаем диаметры для оставшихся объектов.

Объект с наименьшим диаметром можно удалить.

Далее, анализируя рисунки 9 и 3, можно сделать вывод о том, что два левых объекта на рисунке 9 не являются результатом сварочных работ (отверстие и грани фланца). Поэтому они не учитываются при выработке решения о наличии дефектов во фланце.

В результате работы алгоритма специалист получает информацию, на основании которой делает вывод о наличии или отсутствии дефектов в исследуемом изделии. В рассмотренном примере видно, что линии (объекты справа) непрерывны и не имеют резкой смены направлений. Поэтому можно сделать вывод об отсутствии нарушений сплошности (дефектов) в изделии.

Следует заметить, что бинарные изображения по желанию исследователя можно инвертировать.

Инструментарий, применяемый при обработке изображений, может быть совершенно различным [20]. Авторы в ходе представленных исследований использовали MATLAB [21].

Необходимо отметить, что данная процедура является открытой, то есть к ней можно (и даже нужно) подключать различные методы для работы с цифровыми изображениями, например, для реконструкции смазанных изображений. В этом случае необходимо использовать интегральное уравнение Фредгольма I рода, решение которого представляет собой достаточно сложную задачу.

Поэтому привлечение различных методов, например тихоновской регуляризации, является необходимым условием.

Литература

1. Неразрушающий контроль; [под общ. ред. В.В. Клоева]. Т. 1. Кн. 1: Соснин Ф.Р. Визуальный и измерительный контроль. М.: Машиностроение, 2008. 323 с.
2. Исаев М.А., Круглов И.А. Дефекты сварных соединений. Фотоальбом: практич. пособие. М.: Спектр, 2013. 84 с.
3. Шелихов Г.С., Глазков Ю.А. Магнитопорошковый контроль: учеб. пособие. М.: Спектр, 2011. 183 с.
4. Шелихов Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия М.: Спектр, 2010. 336 с.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. Pearson Intern. Edition prepared by Pearson Education, 2008, 954 p.
6. Конушин А., Барина О., Конушин В., Якубенко А., Велижев А. Введение в компьютерное зрение. 2013. URL: http://courses.graphicon.ru/files/courses/vision/2010/cv_2010_01.pdf (дата обращения: 13.06.16).
7. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2008. 192 с.
8. Gatchin Y.A., Zharinov I.O., Korobeinikov A.G., Zharinov O.O. Theoretical estimation of grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems. Modern Applied Science, 2015, vol. 9, no. 5, pp. 197–210.
9. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Методы и модели цифровой обработки изображений. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 190 с.
10. Красильников Н.Н. Реставрация изображений с учетом их структуры // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 2. С. 7–12.
11. Красильников Н.И. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учеб. пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
12. Jahne B. Digital Image Processing. Springer Sc. & Business Media, 2005, 608 p.
13. Tschumperle D. Fast anisotropic smoothing of multi-valued images using curvature-preserving. PDE's Init'l Jour. on Comp. Vision, 2006, no. 68 (1), pp. 65–82.
14. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Функциональная надежность систем реального времени // Науч.-технич. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2013. № 4. С. 150–151.
15. Коробейников А.Г., Кудрин П.А., Сидоркина И.Г. Алгоритм распознавания трехмерных изображений с высокой детализацией // Вестн. Поволж. гос. технологич. ун-та. Сер.: Радиотехнич. и инфокоммуникационные системы. 2010. № 2. С. 91–98.
16. Коробейников А.Г., Алексанин С.А. Методы автоматизированной обработки изображений при решении задачи магнитной дефектоскопии // Кибернетика и программирование. 2015. № 4. С. 49–61; DOI: 10.7256/2306-4196.2015.4.16320; URL: http://e-notabene.ru/kp/article_16320.html (дата обращения: 13.06.16).
17. Liu C., Szeliski R., Sing Bing Kang, Zitnick C.L., Freeman W.T. Automatic estimation and removal of noise from a single image // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, vol. 30.1, no. 2, pp. 299–314.
18. Voskoboynikov Yu.E. A combined nonlinear contrast image reconstruction algorithm under inexact point-spread function. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2007, no. 6, pp. 489–499.
19. Кирьянов К.А. Инструментальная реализация алгоритмов реконструкции искаженных изображений // GraphiCon-2010: сб. тр. 20-й Междунар. конф. СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2010. С. 188–191.
20. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Князь В.А. и др. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007. 464 с.
21. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. Digital image processing using MATLAB. Gatesmark Publ. a Division of Gatesmark, LLC, 2009, 827 p.

AUTOMATED DIGITAL PROCESSING OF IMAGES IN SOLVING THE PROBLEM OF MAGNETIC DEFECTOSCOPY

A.G. Korobeynikov¹, *Dr.Sc. (Engineering), Professor, korobeynikov_a_g@mail.ru*

V.I. Polyakov¹, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, v_i_polyakov@mail.ru*

M.E. Fedosovsky¹, *Ph.D. (Engineering), Professor, stts@diakont.com*

S.A. Aleksanin¹, *Postgraduate Student, aleksanin@diakont.com*

¹ *The National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky Ave. 49, St. Petersburg, 197101, Russian Federation*

Abstract. The methods that are based on the analysis of dispersion of magnetic fields near defects after magnetization of these products allow determining the existence of defects in a surface coat of steel details, for example cracks. In areas with continuity violation there will be a change of a magnetic flux. One of the most known methods of magnetic fault detection is the method of magnetic powder. In this case we apply magnetic powder (a dry method) or magnetic suspension (a wet method) on a surface of a magnetized detail. When using luminescent powders or suspensions, defects are more visible on the images of the studied details. Therefore, there is a possibility of automated image processing. The paper presents an automated procedure of choosing image processing methods. It also provides an example of processing a steel detail image aiming to detect its defects by means of shining lines, which appear after applying a wet method. Software implementation of the proposed approach is in MATLAB. The authors determine ways and methods that might be included in the abovementioned procedure to improve it.

Keywords: magnetic fault detection, image processing, improvement of images, morphological processing of images.

References

1. *Nerazrushayushchy kontrol* [Non-destructive Control]. V.V. Klyuev (Ed.), Sosnin F.R. *Vizualny i izmeritelny kontrol* [Visual and Measurement Control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, vol. 1, book 1, 323 p.
2. Isaev M.A., Kruglov I.A. *Defekty svarynykh soedineniy. Fotoalbum* [Welding Defects. Photoalbum]. Practical guide. SPEKTR, 2013, 84 p.
3. Shelikhov G.S., Glazkov Yu.A. *Magnitoporoshkovaya defektoskopiya* [Magnetic Powder Inspection]. Study guide. SPEKTR Publ., 2011, 183 p.
4. Shelikhov G.S. *Magnitoporoshkovaya defektoskopiya* [Magnetic Powder Inspection]. SPEKTR Publ., 2010, 336 p.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. 3rd ed. Pearson Int. Edition prepared by Pearson Education, 2008, 954 p.
6. Konushin A., Barinova O., Konushin V., Yakubenko A., Velizhev A. *Vvedenie v kompyuternoe zrenie* [Introduction to Computer Vision]. MGU VMK Publ., Graphics&Media Lab, 2013. Available at: http://courses.graphicon.ru/files/courses/vision/2010/cv_2010_01.pdf (accessed June 13, 2016).
7. Fisenko V.T., Fisenko T.Yu. *Kompyuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy* [Computer Processing and Image Recognition]. Study guide. St. Petersburg, SPbGU ITMO Publ., 2008, 192 p.
8. Gatchin Y.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Zharinov O.O. Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems. *Modern Applied Science*. 2015, vol. 9, no. 5, pp. 197–210.
9. Grishentsev A.Yu., Korobeynikov A.G. *Metody i modeli tsifrovoy obrabotki izobrazheniy* [Methods and Models of Digital Image Processing]. St. Petersburg, Politekhichesky Univ. Publ., 2014, 190 p.
10. Krasilnikov N.N. Image restoration considering their structure. *Optichesky zhurnal* [Optical Journal]. 2009, vol. 76, no. 2, pp. 7–12 (in Russ.).
11. Krasilnikov N.I. *Tsifrovaya obrabotka 2D- i 3D-izobrazheniy* [2D and 3D Image Digital Processing]. Study guide. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2011, 608 p.
12. Jahne B. *Digital Image Processing*. 6th ed. Springer Science & Business Media Publ., 2005, 608 p.
13. Tschumperle D. Fast anisotropic smoothing of multi-valued images using curvature-preserving. *PDE's Init'l Jour. on Computer Vision*. 2006, no. 68 (1), pp. 65–82.
14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Functional reliability of real-time systems. *Nauchno-tekhnichesky vestnik ITMO* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2013, no. 4, pp. 150–151 (in Russ.).
15. Korobeynikov A.G., Kudrin P.A., Sidorkina I.G. 3D images recognition algorithm with high resolution. *Vestnik Povolzhskogo gos. tekhnologicheskogo univ. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radioengineering and Infocommunication Systems]. 2010, no. 2, pp. 91–98 (in Russ.).
16. Korobeynikov A.G., Aleksanin S.A. Methods of automated image processing when solving a magnetic flaw detection problem. *Cybernetics and programming*, 2015, no. 4, pp. 49–61; DOI: 10.7256/2306-4196.2015.4.16320; URL: http://e-notabene.ru/kp/article_16320.html (accessed June 13, 2016).
17. Liu C., Szelski R., Kang S.B., Zitnick C.L., Freeman W.T. Automatic Estimation and Removal of Noise from a Single Image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2008, vol. 30.1, no. 2, pp. 299–314.
18. Voskoboinikov Yu.E. A Combined Nonlinear Contrast Image Reconstruction Algorithm under Inexact Point-Spread Function. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2007, no. 6, pp. 489–499.
19. Kiryanov K.A. Tool implementation of image restoration algorithms. *Trudy 20 Mezhdunar. konf. "GraphiCon-2010"* [Proc. 20th Int. Conf. "GraphiCon-2010"]. St. Petersburg, SPbGU ITMO Publ., 2010, pp. 188–191 (in Russ.).
20. Vizilter Yu.V., Zheltov S.Yu., Knyaz V.A. *Obrabotka i analiz tsifrovyykh izobrazheniy s primerami na LabVIEW IMAQ Vision* [Digital Image Processing and Analysis with examples in LabVIEW IMAQ Vision]. Moscow, DMK Press, 2007, 464 p.
21. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2nd ed., Gatesmark Publ., A Division of Gatesmark, LLC, 2009, 827 p.