

УДК 621.372.542

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ИЗОБРАЖЕНИЯ С СУБПИКСЕЛЬНОЙ ТОЧНОСТЬЮ

КУДРЕВАТЫХ А. Т.¹, *заведующий учебной лабораторией неразрушающих методов контроля,*
КУИНН Н. А.^{2*}, *старший преподаватель,*
ДЕРГАЛЬ Е. С.^{3*}, *студент.*

¹ Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, проспект Гагарина, 72, г. Днепр, 49010

^{2*} Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, проспект Гагарина, 72, г. Днепр, 49010, +380674956587, quinnsqueen2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7124-6030

^{3*} Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, проспект Гагарина, 72, г. Днепр, 49010

Аннотация. *Целью* данного исследования являлась оценка точности измерений сдвига изображения в плоскости ПЗС-матрицы при создании технологии контроля терморазмеростабильности технических изделий из углерод-полимерных материалов. **Методика.** При проведении исследований использованы методы математического моделирования и анализа цифровых изображений с использованием пакета MATLAB. Величину сдвига изображения предложено определять по сдвигу геометрического центра реперной марки. В качестве реперной марки использована математическая модель цифрового изображения лазерного пятна. **Результаты.** Разработана методика моделирования субпиксельного сдвига изображения лазерного пятна. В ходе вычислительных экспериментов произведена оценка точности определения сдвига изображения. Исследовано влияние изменения количества уровней квантования яркости при предварительной обработке исходного изображения на чувствительность измерений. Подтверждено наличие соответствия между информативными параметрами технического изображения и параметрами, характеризующими субпиксельный сдвиг изображения. **Научная новизна** исследования заключается в постановке проблемы контроля термостабильности изделий из углерод-полимерных композиционных материалов путем измерения сдвига цифровых изображений и исследовании влияния условий записи изображения на чувствительность и точность измерений. Методами моделирования подтверждена возможность определения с субпиксельной точностью сдвига изображения при использовании ПЗС-матриц. **Практическая значимость.** Решение данной задачи позволит создать новые измерительные технологии входного контроля деталей, изготовленных из углепластиковых материалов с низким коэффициентом температурного расширения. Таким образом, становится возможным как выходной контроль термостабильности крупногабаритных изделий, так и мониторинг размеростабильности изделий в рабочих условиях, в том числе в условиях изменяющейся влажности. Область практического использования данных результатов - системы технического зрения, мониторинг состояния технических объектов космического назначения, в частности телескопов, ферменных конструкций и антенн космического базирования, изготовленных из материалов с низким коэффициентом температурного расширения, а также проектирование цифровых автоколлиматоров.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; углерод-полимерные композиционные материалы, цифровое изображение, моделирование, сдвиг, субпиксел

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ЗСУВУ ЗОБРАЖЕННЯ ІЗ СУБПІКСЕЛЬНОЮ ТОЧНІСТЮ

КУДРЕВАТЫХ О. Т.¹, *завідувач навчальної лабораторії неруйнівних методів контролю,*
КУИНН Н. О.^{2*}, *старший викладач,*
ДЕРГАЛЬ К. С.^{3*}, *студент.*

¹ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, м. Дніпро, 49010

^{2*} Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, м. Дніпро, 49010, +380674956587, quinnsqueen2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7124-6030

^{3*} Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, м. Дніпро, 49010

Анотация. *Метою* даного дослідження була оцінка точності вимірювань зсуву зображення в площині ПЗС-матриці при створенні технології контролю терморазмеростабильности технических виробів з вуглець-полімерних матеріалів. **Методика.** При проведенні досліджень використані методи математичного моделювання та аналізу цифрових зображень з використанням пакета MATLAB. Величину зсуву зображення запропоновано визначати за зсувом геометричного центру реперної марки. Реперна марка являє собою математичну модель цифрового зображення лазерної плями. **Результати.** Розроблено методику моделювання субпиксельного зсуву зображення лазерної плями. В ході обчислювальних експериментів проведена оцінка точності визначення зсуву зображення. Досліджено вплив зміни кількості рівнів квантування яскравості при попередній обробці вихідного зображення на чутливість вимірів. Підтверджено наявність відповідності між информативними параметрами технічного зображення і параметрами, що характеризують субпиксельний зсув зображення. **Наукова новизна** дослідження полягає в постановці проблеми контролю термостабильности виробів з

вуглець-полімерних композиційних матеріалів шляхом вимірювання зсуву цифрових зображень і дослідженні впливу умов запису зображення на чутливість і точність вимірювань. Методами моделювання підтверджена можливість визначення з субпіксельною точністю величини зсуву зображення при використанні ПЗС-матриць. **Практична значимість.** Рішення даної задачі дозволить створити нові вимірювальні технології вхідного контролю деталей, виготовлених з вуглепластикових матеріалів з низьким коефіцієнтом температурного розширення. Таким чином, стає можливим як вихідний контроль термостабільності великогабаритних виробів, так і моніторинг розміростабільності виробів в робочих умовах, в тому числі в умовах змінної вологості. Область практичного використання даних результатів - системи технічного зору, моніторинг стану технічних об'єктів космічного призначення, зокрема телескопів, ферментних конструкцій і антен космічного базування, виготовлених з матеріалів з низьким коефіцієнтом температурного розширення, а також проектування цифрових автоколіматорів.

Ключові слова: неруйнівний контроль; вуглецево-полімерні композиційні матеріали; цифрове зображення; моделювання; зсув; субпіксел

SIMULATION OF THE IMAGE SHEAR MEASUREMENT WITH SUBPIXEL ACCURACY

KUDREVATYKH O. T.¹, *Head of the Non-destructive testing training laboratory,*
 QUINN N. O.^{2*}, *Senior Lecturer,*
 DERGAL K. S.^{3*}, *Student.*

¹ Oles Honchar Dnipro National University, 72 Gagarin avenue, Dnipro, 49010

^{2*} Oles Honchar Dnipro National University, 72 Gagarin avenue, Dnipro, 49010, +380674956587, quinnsqueen2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7124-6030

^{3*} Oles Honchar Dnipro National University, 72 Gagarin avenue, Dnipro, 49010

Abstract. *The purpose of this research* was the evaluation of measurement accuracy for image motion in CCD matrix plane while creating a testing technology for thermal stability of technical products made of the carbon fiber reinforced plastic. **Methodology.** Mathematical modeling methods and digital image analysis (using MATLAB) have been used during the research. The magnitude of the image shear is suggested to be determined from the shift of the reference mark geometric center. Mathematic model of the laser spot digital image is used as a reference mark. **Findings.** Modeling technique for sub-pixel shear of a laser spot has been developed. Accuracy estimation of the image shear determination was made during the experiment. Impact of the change in the number of luminance quantization levels by preliminary processing of the original image was investigated for evaluation measurement sensitivity. The correspondence between the informative parameters of the technical image and the parameters characterizing the sub-pixel image shift has been confirmed. **Originality** of this study is the admission of the problem in controlling the thermostability of products made of carbon reinforced polymer composite materials by measuring the shear of digital images and investigating the effect of image recording conditions on the sensitivity and accuracy of measurements. Modeling techniques confirmed possibility of determining an image shear with sub-pixel accuracy using CCD matrix. **Practical value.** The solution of this problem will allow creating new measurement technologies for the input control of parts made of carbon reinforced plastic materials with a low coefficient of thermal expansion. Thus, it becomes possible as an output control of large-sized products thermostability, as well as monitoring the dimensional stability of products under operating conditions, including varying humidity conditions. The practical area of this results would be technical vision systems, aerospace technical facilities monitoring, particularly telescopes, truss structures and space-based antennas made of materials with a low coefficient of thermal expansion, as well as the design of digital autocollimators.

Keywords: non-destructive testing; carbon fiber reinforced plastic; digital image; simulation; shear; subpixel

Постановка проблемы

В настоящее время оптические методы контроля состояния технических объектов приобретают все более широкое распространение. Активное внедрение оптических систем и технологий неразрушающего контроля и мониторинга обусловлено рядом факторов – бесконтактность контроля, отсутствие требований по специальной подготовке контролируемой поверхности, стремительное развитие аппаратуры цифровой регистрации изображений, характеризующееся миниатюризацией, ростом чувствительности и разрешающей способности матричных приемников оптического излучения, и совершенствование компьютерных технологий анализа изображений,

обусловленное повышением производительности компьютерной техники.

Системы технического зрения широко используются в системах автоматического управления, в приборах и системах неразрушающего контроля и мониторинга в промышленности и экологии, как средства разведки ископаемых в геологии, в медицинской диагностике, системах видеонаблюдения, интеллектуальных транспортных системах, а также в военной и космической технике.

Основная проблема при использовании систем технического зрения в неразрушающем контроле и мониторинге – установление соответствия между информативными параметрами технического изображения и параметрами, характеризующими состояние объекта контроля.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время основным направлением в решении проблемы оценки изменений состояния объектов контроля на основе анализа их изображений является создание и развитие технологий оценки изменения информативных параметров цифровых изображений - спектральных и энергетических характеристик изображения, координат локализованных точек и областей интереса (линий, контуров, геометрических фигур).

Для обработки визуальной информации используются различные методы: детектирование, сегментация, подсчет пикселей, декодирование, работа по контуру, бинаризация, символьное распознавание, сопоставление шаблонов и др. [1, 7, 8].

Стремительное развитие в настоящее время получил метод оценки изменения состояния объекта на основе сравнения статистических характеристик различных состояний объекта – метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation) [3, 4, 6].

При анализе изображений с целью оценки деформационного состояния материала при воздействии на него механической нагрузки помимо подходов, основанных на вычислении информативных параметров, используют спектральный подход, основанный на использовании алгоритма быстрого преобразования Фурье, фрактальный анализ, подходы, основанные на вейвлет-преобразованиях [1].

С их помощью решаются задачи распознавания образов, определения координат точек объектов, а также изменения их расположения в пространстве и отклонения от заданных технических параметров. Примером многофункционального программного комплекса для решения подобных задач является Open eVision, разработанный фирмой Framos GmbH, который позволяет, в частности, осуществлять измерения размеров и формы с субпиксельной точностью [5].

Лидерами в создании измерительных средств высокой точности на основе систем технического зрения на сегодняшний день являются фирмы OMRON, National Instruments, DataLogic, IVISYS, Ponfac, Teledyne Scientific&Imaging.

Повышение точности измерений до субпиксельного уровня в оптоэлектронных системах, являющихся основой систем технического зрения, позволяет осуществлять неразрушающий контроль изделий при минимальных испытательных нагрузках. Эта задача является особо актуальной в области космического и авиастроения, поскольку здесь наиболее активно используются композиционные углерод-полимерные материалы, характерным отличием которых является высокая устойчивость к механическим и тепловым нагрузкам. Вследствие этого изменение формы и положения элементов конструкций в ходе испытаний приводит к субмикронным перемещениям точек поверхности

контролируемых объектов, что затрудняет их контроль и приводит к значительным погрешностям при измерениях традиционными методами и средствами.

Цель

Целью данного исследования являлась оценка точности измерений сдвига изображения в плоскости ПЗС-матрицы при создании технологии контроля терморазмеростабильности технических изделий из углерод-полимерных материалов. В качестве объекта исследования была выбрана математическая модель цифрового изображения лазерного пятна. Данное пятно представляет собой модель реперной марки на плоскости ПЗС-матрицы, с помощью которой производятся измерения. Предмет исследования – изменение характеристик цифрового изображения реперной марки при сдвиге, обусловленном изменением состояния объекта.

Для достижения поставленной цели на первом этапе необходимо решить несколько задач:

- моделирование цифрового изображения реперной марки,
- моделирование субпиксельного сдвига изображения реперной марки,
- исследование влияния параметров регистрации изображения на точность измерений.

Сдвиг изображения вследствие изменения состояния объекта контроля является одним из факторов, которые приводят к изменению энергетических характеристик изображения, в частности, к изменению распределения градаций яркости в области изображений, то есть к изменению матрицы изображения (генеральной матрицы). При малой величине сдвига, то есть при микро- и наносдвиге изображения, измерение величины сдвига путем оценки изменений генеральной матрицы приводит к существенным ошибкам, так как точность определения величины сдвига при стационарных условиях контроля определяется разрешающей способностью матрицы, то есть размером пикселя светочувствительной матрицы и расстоянием между пикселями. Разработка механизма оценки изменений распределения освещенности вследствие сдвига изображения в пределах области регистратора, сравнимой с размерами пикселя (субпиксельной области), позволит повысить точность измерений. Для измерения сдвига изображения с субпиксельной точностью необходимо решить задачу оценки влияния изменений в субпиксельной области (то есть изменений субпиксельной матрицы) на матрицу изображения, то есть генеральную матрицу.

Методика

В качестве источников освещения, а также для создания реперных марок (областей интереса), в измерительных системах в основном используют лазеры. При этом изменение положения в

пространстве исследуемого участка объекта, происходящее вследствие его деформирования, можно определить, исходя из смещения реперной марки - лазерного пятна в плоскости цифрового регистратора. Поэтому первым этапом в решении поставленной задачи являлось моделирование изображения реперной марки, полученного с помощью цифрового регистратора.

В качестве изображения реперной марки использовалась модель пятна, полученного при дифракции Фраунгофера лазерного луча на круглом отверстии $d = 0,5$ мм на расстоянии 4 м (рис. 1).

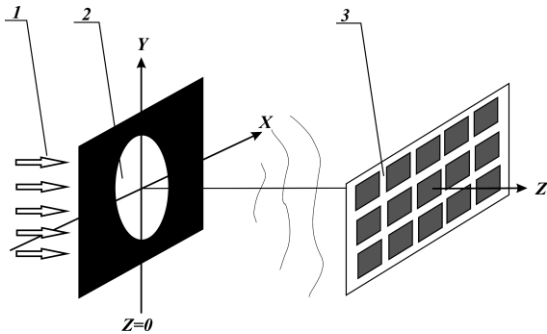


Рис. 1. Регистрация изображения реперной марки:
1 – лазерное излучение; 2 – диафрагма; 3 – ПЗС-матрица /
Registration of the reference mark image:
1 – laser beam; 2 – diaphragm; 3 – CCD matrix

Распределение интенсивности света в плоскости регистратора определяется уравнением

$$\begin{aligned} \psi_p(x, y, z) = & \exp(-jk_0 z) \frac{-jk_0}{2\pi z} * \\ & * \exp\left[\frac{-jk_0}{2z}(x^2 + y^2)\right] * \\ & * \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{p_0}(x', y') \exp\left[\frac{-jk_0}{2z}(xx' + yy')\right] dx' dy', \quad (1) \end{aligned}$$

где $\psi_{p_0}(x', y')$ – комплексная амплитуда световой волны в плоскости источника освещения, то есть в плоскости отверстия диафрагмы,

$\psi_p(x, y, z)$ – комплексная амплитуда световой волны в плоскости наблюдения, то есть в плоскости ПЗС-матрицы регистратора, расположенной на расстоянии z от диафрагмы,

$k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число, определяемое длиной волны λ лазерного излучения.

Полученная модель лазерного пятна и распределение яркости изображения в плоскости регистратора при дифракции лазерного луча на круглой диафрагме представлена на рисунках 2, 3.

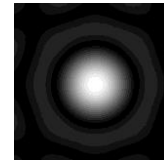


Рис. 2. Модель лазерного пятна при дифракции Фраунгофера на круглом отверстии / Laser spot model at the Fraunhofer diffraction by circular aperture

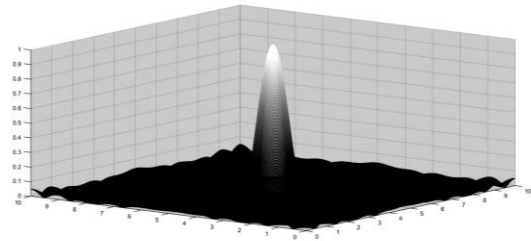


Рис. 3. Распределение яркости в изображении лазерного пятна при дифракции Фраунгофера на круглом отверстии / The brightness distribution in the laser spot image at the Fraunhofer diffraction by circular aperture

Вторым этапом исследований являлось моделирование сдвига лазерного пятна в плоскости матрицы регистратора изображения на примере ПЗС-матрицы.

Современные ПЗС матрицы представляют из себя уникальный измерительный прибор, который одновременно формирует информационный сигнал и является измерительной двумерной шкалой. Как правило, топология ПЗС матрицы ортогональная. Ценой деления шкалы, связанной с матрицей, выступает пиксел – светочувствительный элемент размером до 1 мкм, при изготовлении которого обеспечивается точность соблюдения размеров до 0,01 мкм. Информационный сигнал – яркость области пиксела, соответствующая суммарной энергии, полученной пикселом за время экспозиции. Поэтому ПЗС матрицы являются удобным инструментом для решения прецизионных измерительных задач. В работе [2] показано, что точность определения сдвига центра тяжести изображения реперной марки может достигать 1 нм.

Для оценки точности измерения сдвига центра тяжести изображения использовалась модель, представленная на рисунке 4.

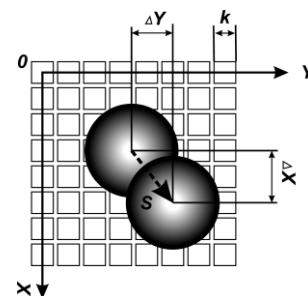


Рис. 4. Модель измерения сдвига изображения / Image shear measurement model

Предположим, что деформация объекта контроля в процессе испытаний приводит к сдвигу изображения реперной марки в плоскости регистратора. Величина этого сдвига S согласно представленной модели (рис.1) будет определяться следующим выражением:

$$S = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (2)$$

где ΔX , ΔY – проекции вектора сдвига \vec{S} на соответствующие координатные оси измерительной шкалы, связанной с ПЗС-матрицей регистратора.

При моделировании сдвига на доли пиксела каждый пиксел ПЗС матрицы был представлен в виде матрицы 100x100 элементов. Значение яркости пиксела, таким образом, будет равно среднему значению яркости матрицы элементов-субпикселей. При сдвиге изображения на $n = 1, 2, 3, \dots$ элементов-субпикселей будет происходить изменение значений яркости субпикселей, приводящее к изменению яркости пиксела в целом, что в конечном счете дает возможность проводить вычисления сдвига изображения с субпиксельной точностью. Вычисляя центры тяжести изображения до сдвига и после, можно оценить точность определения сдвига изображения при использовании в качестве измерительного инструмента шкалы ПЗС матрицы. При этом следует учитывать, что сдвиг на 1 субпиксел в масштабированной матрице соответствует сдвигу на 0,01 пиксела реальной матрицы изображения на регистраторе, то есть можно считать, что при данном коэффициенте масштабирования 1 субпиксел = 0,01 пиксела.

Размер моделируемого изображения, соответствующего рисунку 2, составлял 52000 x 52000 пикселей. Из полученного изображения была сформирована серия одинаковых изображений размером 50000 x 50000 пикселей таким образом, чтобы координаты центров лазерного пятна на всех изображениях совпадали. После этого осуществлялся сдвиг лазерного пятна во всех изображениях, кроме одного, которое принималось опорным при вычислении сдвига. Величина сдвига относительно центра пятна на опорном изображении составляла $n = 1, 2, 3, \dots$ субпикселей.

Все смоделированные изображения уменьшались в 100 раз. Процесс масштабирования осуществлялся по алгоритму, обратному алгоритму моделирования сдвига изображения. Матрица значений яркости исходного изображения делилась на области размером 100x100 пикселей и определялось среднее значение яркости для каждой из этих областей. Вычисленное значение яркости присваивалось пикселу масштабированной матрицы изображения. В результате процесса масштабирования были получены вторичные изображения размером 500x500 пикселей.

После этого осуществлялась сегментация вторичных изображений по методу Оцу и средствами MATLAB по формуле (3) вычислялся

геометрический центр полученной фигуры (рис. 5) по следующим формулам:

$$X_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (3)$$

$$Y_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i, \quad (4)$$

где X_i , Y_i – координаты выделенных пикселей, N – количество выделенных пикселей.

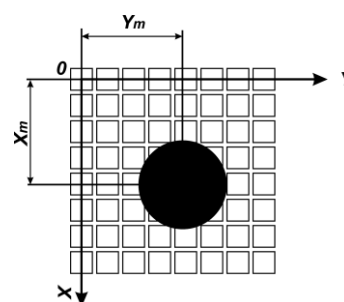


Рис. 5. Координаты центра лазерного пятна / Laser spot center coordinates

На последнем этапе исследований определялось изменение координат центра лазерного пятна сдвинутого масштабированного изображения относительно опорного масштабированного изображения в отсутствие сдвига:

$$\Delta X = X_{m_i} - X_{m_0}, \quad (5)$$

$$\Delta Y = Y_{m_i} - Y_{m_0}, \quad (4)$$

где X_{m_0} , Y_{m_0} – координаты центра пятна на опорном изображении, X_{m_i} , Y_{m_i} – координаты центра пятна на i -том сдвинутом изображении.

Результаты проведенных численных экспериментов отражены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Изменение координат центра пятна при сдвиге изображения вдоль одной оси/ The change of the spot center coordinates with the image shear along one axis

№ п/п	Заданный сдвиг		Координаты центра		Вычисленный сдвиг	
	n_x , пкс	n_y , пкс	X_m , пкс	Y_m , пкс	n_x , пкс	n_y , пкс
1	0	0	250,5	250,5	0	0
2	0,01	0	250,5	250,5	0	0
3	0,02	0	250,5	250,5	0	0
4	0,05	0	250,5	250,5	0	0
5	0,1	0	250,632	250,5	0,132	0
6	0,2	0	250,658	250,5	0,158	0
7	0,4	0	250,916	250,5	0,416	0
8	0,6	0	251,084	250,5	0,584	0
9	0,8	0	251,342	250,5	0,842	0
10	1	0	251,5	250,5	1	0

Таблица 2

Изменение координат центра пятна при сдвиге изображения относительно обеих осей/ The change of the spot center coordinates with the image shear along two axis

№ п/п	Заданный сдвиг		Координаты центра		Вычисленный сдвиг	
	n_x , пкс	n_y , пкс	X_m , пкс	Y_m , пкс	n_x , пкс	n_y , пкс
1	0	0	250,5	250,5	0	0
2	0,01	0,01	250,5	250,5	0	0
3	0,02	0,02	250,5	250,5	0	0
4	0,05	0,05	250,539	250,539	0,039	0,039
5	0,1	0,1	250,604	250,604	0,104	0,104
6	0,2	0,2	250,682	250,682	0,182	0,182
7	0,4	0,4	250,905	250,905	0,405	0,405
8	0,6	0,6	251,095	251,095	0,595	0,595
9	0,8	0,8	251,318	251,318	0,818	0,818
10	1	1	251,5	251,5	1	1

Анализ полученных результатов показывает, что использование современных методов и средств регистрации и обработки цифровых изображений позволяет создать технологию контроля изменения состояния технических изделий из углерод-полимерных материалов с субпиксельной точностью. При этом можно увидеть, что для заданных условий проведения эксперимента (параметры оптической схемы, алгоритмы масштабирования и обработки изображения), чувствительность определения сдвига пятна достигает 0,1 размера пиксела при смещении вдоль одной оси. При одновременном смещении относительно обеих координатных осей чувствительность повышается до 0,04 размера пиксела. Таким образом, при размере пиксела 1 мкм чувствительность данной технологии измерения величины сдвига изображения составляет 0,1 мкм и 0,04 мкм соответственно.

Конкретные метрологические характеристики измерительной технологии можно оценить только с учетом конфигурации реальной измерительной схемы и размеров контролируемого объекта.

На данном этапе были проведены дополнительные исследования влияния количества уровней квантования яркости на чувствительность технологии измерения сдвига. Сравнивалась чувствительность измерений, полученная при 8-битовом (таблицы 1, 2) и 12-битовом квантовании уровней яркости. Результаты измерений для 12-битового квантования отражены в таблице 3.

Результаты моделирования показывают, что повышение количества уровней квантования яркости в 1,5 раза, приводит к повышению чувствительности до 0,01 пиксела, то есть в несколько раз повышает чувствительность технологии измерения сдвига изображения.

Таблица 3

Изменение координат центра пятна при сдвиге изображения для 12-битового квантования яркости/ The change of the spot center coordinates for a 12-bit brightness quantization

№ п/п	Заданный сдвиг		Координаты центра		Вычисленный сдвиг	
	n_x , пкс	n_y , пкс	X_m , пкс	Y_m , пкс	n_x , пкс	n_y , пкс
1	0	0	250,5	250,5	0	0
2	0,01	0,01	250,513	250,5	0,013	0
3	0,02	0,02	250,524	250,5	0,024	0
4	0,05	0,05	250,550	250,5	0,05	0
5	0,1	0,1	250,593	250,5	0,093	0
6	0,2	0,2	250,709	250,5	0,209	0
7	0,4	0,4	250,908	250,5	0,408	0
8	0,6	0,6	251,092	250,5	0,592	0
9	0,8	0,8	251,291	250,5	0,792	0
10	1	1	251,5	250,5	1	0

Выводы

Моделирование процесса сдвига изображения подтвердило возможность измерений сдвига с субпиксельной точностью, что позволяет осуществлять разработку технологий контроля объектов с высокой механической и термостабильностью.

Анализ влияния характеристик цифрового изображения на точность определения величины сдвига продемонстрировал, что увеличение количества уровней квантования яркости при предварительной обработке исходного изображения позволяет повысить чувствительность измерений.

Решение задачи измерения сдвига изображения с субпиксельной точностью позволяет создавать новые измерительные технологии для контроля и мониторинга технических объектов с высокой механической и размеростабильностью, в частности, изделий из композиционных углерод-полимерных материалов.

Результаты исследований могут быть использованы при создании систем технического зрения для мониторинга состояния технических объектов по изменению их геометрических параметров. Особую практическую ценность результаты исследования представляют для разработки технологий контроля и мониторинга изделий космического назначения, в частности телескопов космического базирования и ферменных конструкций антенн.

В ходе дальнейших исследований предполагается изучить влияние на точность измерения сдвига следующих факторов:

- выбор метода определения и величины порогового критерия сегментации;
- влияние шумов изображения (неравномерность освещенности, теневые шумы фоторегистратора);
- влияние способа сжатия изображения при сохранении, то есть выбор оптимального формата и степени сжатия сохраняемого файла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ изображений в оптическом методе оценки деформации / С. В. Панин, П. С. Любутин, В. В. Титков // Новосибирск: Изд-во СО РАН. - 2017. - 288 с.
2. Королев А.Н., Гарцуев А.И., Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС матрице / А. Н. Королев, А. И. Гарцуев // Измерительная техника. – 2004. – № 5. – с. 20-22.
3. Blaber J. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software / J. Blaber, B. Adair, A. Antoniou // *Experimental Mechanics*. – 2015. – Available at: <http://www.ncorr.com/download/publications/blaberncorr.pdf> DOI 10.1007/s11340-015-0009-1 (viewed on Sept 22, 2018).
4. Hohmanna B. P. Digital Image Correlation (DIC): An Advanced Nondestructive Testing Method for Life Extension of Nuclear Power Plants / B. P. Hohmanna, P. Brucka, T. C. Esselmana, T. Schmidt // 3rd International Conference on NPP Life Management (PLIM) for Long Term Operations (LTO), Salt Lake City, UT, USA 14-18 May 2012 Conference ID: 41982 (CN-194) - Available at: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/43/070/43070819.pdf> (viewed on Sept 22, 2018).
5. Image Analysis Software Tools. Available at: https://www.framos.com/media/pdf/af/fe/0a/datasheet_euresys_open_evision.pdf (viewed on Sept 22, 2018).
6. Laurina F. Determination of the properties of composite materials thanks to digital image correlation measurements / F. Laurina, J.-S. Charriera, D. Lévêquea, J.-F. Mairea, A. Mavela, P. Nuñez // *Procedia IUTAM*. – 2012. – №4. - P. 106 – 115. Available at: https://ac.els-cdn.com/S2210983812000363/1-s2.0-S2210983812000363-main.pdf?_tid=spdf-14f8a0ee-c8c6-4f66-b2b7-06986a3cdd33&acdnat=1519681422_b59eb37f700132190728ce3980a6234d (viewed on Sept 22, 2018).
7. Mutneja D. Methods of Image Edge Detection: A Review / D. Mutneja, V. Mutneja // *J. Electr. Electron. Syst.*, 2015. – Vol. 4, № 2. – Available at: <https://www.omicsonline.org/open-access/methods-of-image-edge-detection-a-review-2332-0796-1000136.pdf> DOI: 10.4172/2332-0796.1000150 (viewed on Sept 22, 2018).
8. Yong J. Z. Robust and automatic measurement of grinding-induced subsurface damage in optical glass K9 based on digital image processing / J. Z. Yong, H. Y. Yun, C. S. Ke, N. L. Hao // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2018. – № 18(1). - P: 320-330. - Available at: https://www.researchgate.net/publication/322171579_Robust_and_automatic_measurement_of_grinding-induced_subsurface_damage_in_optical_glass_K9_based_on_digital_image_processing (viewed on Sept 22, 2018).

REFERENCES

1. Panin S.V., Lyubutin P.S. and Titkov V.V. *Analiz izobrazheniy v opticheskom metode otsenki deformatsii* [Image Analysis in the optical method of deformation evaluation]. Novosibirsk: SO RAN Publ., 2017, 288 p. (in Russian).
2. Korolev A.N. and Gartsuyev A.I., *Issledovaniye tochnosti pozitsionirovaniya izobrazheniya na PZS matritse* [Investigating accuracy of the image positioning on the CCD-matrix]. *Izmeritel'naya tekhnika*. [Measurement techniques]. 2004, no. 5, pp. 20-22. (in Russian).
3. Blaber J., Adair B., and Antoniou A. Ncorr: *Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software*. *Experimental Mechanics*. 2015. – Available at: <http://www.ncorr.com/download/publications/blaberncorr.pdf> DOI 10.1007/s11340-015-0009-1 (viewed on Sept 22, 2018).
4. Hohmanna B. P., Brucka P., Esselmana T.C., and Schmidt T. *Digital Image Correlation (DIC): An Advanced Nondestructive Testing Method for Life Extension of Nuclear Power Plants*. *3rd International Conference on NPP Life Management (PLIM) for Long Term Operations (LTO), Salt Lake City, UT, USA 14-18 May 2012 Conference ID: 41982 (CN-194)*. - Available at: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/43/070/43070819.pdf> (viewed on Sept 22, 2018).
5. *Image Analysis Software Tools*. Available at: https://www.framos.com/media/pdf/af/fe/0a/datasheet_euresys_open_evision.pdf (viewed on Sept 22, 2018).
6. Laurina F., Charriera J.-S., Lévêque D., Mairea J.-F., Mavela A., and Nuñez P. *Determination of the properties of composite materials thanks to digital image correlation measurements*. *Procedia IUTAM*. 2012, no. 4, pp. 106 – 115. Available at: https://ac.els-cdn.com/S2210983812000363/1-s2.0-S2210983812000363-main.pdf?_tid=spdf-14f8a0ee-c8c6-4f66-b2b7-06986a3cdd33&acdnat=1519681422_b59eb37f700132190728ce3980a6234d (viewed on Sept 22, 2018).
7. Mutneja D., Mutneja V. *Methods of Image Edge Detection: A Review*. *J. Electr. Electron. Syst.* 2015, vol. 4, no 2. Available at: <https://www.omicsonline.org/open-access/methods-of-image-edge-detection-a-review-2332-0796-1000136.pdf> DOI: 10.4172/2332-0796.1000150 (viewed on Sept 22, 2018).
8. Yong J., Yun H.Y., Ke C.S., and Hao N.L. *Robust and automatic measurement of grinding-induced subsurface damage in optical glass K9 based on digital image processing*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018, no. 18(1), pp. 320-330. - Available at: https://www.researchgate.net/publication/322171579_Robust_and_automatic_measurement_of_grinding-induced_subsurface_damage_in_optical_glass_K9_based_on_digital_image_processing (viewed on Sept 22, 2018).