

УДК 53.082.52: 692.66: 656.52

*ОСИПОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, канд. техн. наук, вед. научный сотрудник,
osip1809@rambler.ru*

Томский политехнический университет,

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

ПОДШИВАЛОВ ИВАН ИВАНОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,

ivanpodchivalov@list.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет,

634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ОСИПОВ ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, ассистент,

ososipov@rambler.ru

АЛИБЕКОВА АСЕЛ АЙДЫНБЕК КЫЗЫ, магистрант,

alibekova.aselya@mail.ru

ЧЕСНОКОВ ДАНИИЛ ВЛАДИСЛАВОВИЧ, магистрант,

danyabrown@mail.ru

Томский политехнический университет,

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

СПОСОБ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ОПТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Исходя из принципов физической и технической реализуемости обоснована возможность измерения площади оптической неоднородности на поверхности объекта неразрушающих испытаний на основе анализа цифровых изображений с высокой точностью. Приведен способ формирования полутоновых и цветных изображений оптических неоднородностей, базирующийся на специально разработанных критериях. Предложен алгоритм уточнения оценки площади контрастной области на основе учёта граничных эффектов. Обсуждены области применения предлагаемого способа.

Ключевые слова: цифровые изображения; полутоновые изображения; цветные изображения; оптическая неоднородность; оптический контраст; цветной контраст; измерение площади.

SERGEI P. OSIPOV, PhD, Leading Researcher,

osip1809@rambler.ru

Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

IVAN I. PODSHIVALOV, PhD, A/Professor,

ivanpodchivalov@list.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,

2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

OLEG. S. OSIPOV, PhD, Instructor,

ososipov@rambler.ru

ASEL A. ALIBEKOVA, KYZY, Undergraduate Student,

alibekova.aselya@mail.ru

DANIIL V. CHESNOKOV, Undergraduate Student,

danyabrown@mail.ru
Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

ESTIMATION OF OPTICAL INHOMOGENEITY AREA BASED ON DIGITAL IMAGE ANALYSIS

The paper presents the possibility of measuring the area of optical inhomogeneity on the test object surface based on the fine-resolution digital images analysis. A method of formation of half-tone and color images of optical inhomogeneity is suggested based on the especially designed criteria. An algorithm of measuring the contrast area is proposed on the basis of boundary effects. The fields of application of this method are discussed.

Keywords: digital image; grayscale image; color image; optical inhomogeneity; optical contrast; color contrast; area measurement.

Введение

Традиционная фотография широко применяется для фиксации событий и прямого документирования не только в быту, но и в науке и технике. Ее появление в конце XX в. и резкое развитие цифровой фотографии в последнее десятилетие превратили цифровой фотоаппарат (фоторегистратор) в средство для косвенных измерений. Одним из достоинств цифровых оптических изображений является возможность применения методов цифровой обработки изображений с целью выделения и анализа фрагментов, очерчивания границ и т. д. [1–5]. Одним из таких методов является измерение площади оптических неоднородностей. Под оптической неоднородностью на плоскости будем понимать некоторую фигуру, ограниченную замкнутой кривой, для которой характерна однородность по тону (полутонное изображение) или цвету (цветное изображение) и различие с окружающей областью по указанным параметрам. Задачи, связанные с измерением площадей оптических неоднородностей, характерны для многих отраслей науки и техники. К таким задачам относятся: собственно измерение площадей деталей оптических изображений [6]; измерение параметров движения разнообразных объектов [3, 4]; измерение площадей объектов малых размеров [7]; дистанционная оценка площадей полей [8]; площади следов дефектов в капиллярной дефектоскопии [9]. Имеется ряд работ, в которых оцениваются погрешности измерения площади географических объектов по данным космической съёмки [10, 11]. В работах [5, 12, 13] подчёркнута значимость применения фотографических методов для оценки качества работ в строительстве и оценки технического состояния строительных сооружений в процессе эксплуатации. В литературе недостаточно полно рассмотрены вопросы, связанные с измерением площадей оптических неоднородностей в части алгоритмического и метрологического обеспечения.

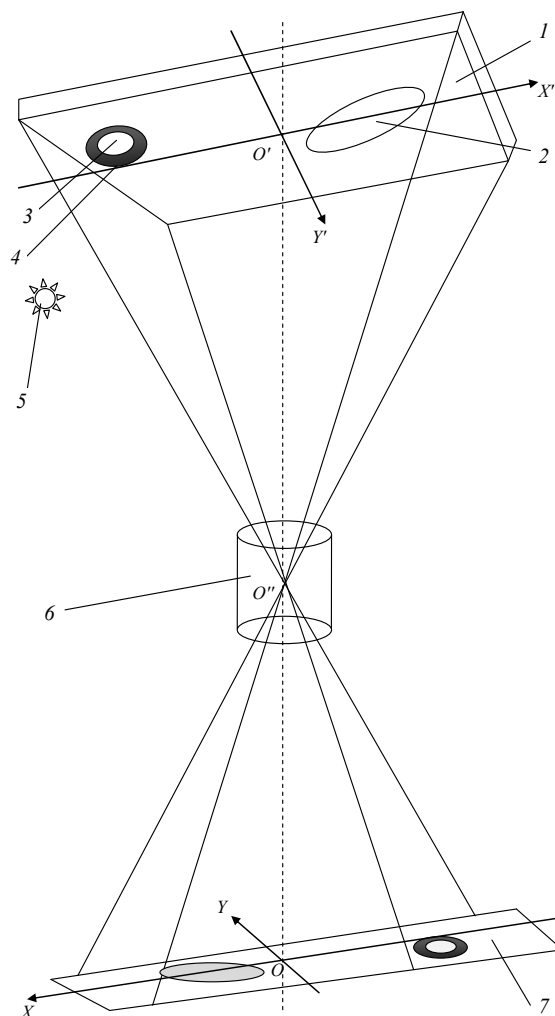
Геометрическая схема формирования цифрового изображения

Измерительная система должна состоять из цифровой фотокамеры, устройства фиксации геометрического положения, источника света, стан-

дартного образца (образцов) площади и вспомогательной контрастирующей площадки. Стандартные образцы должны иметь правильную геометрическую форму – круг, треугольник, прямоугольник. Стандартные образцы площади используются в парах со вспомогательными контрастирующими площадками. При анализе полутонных изображений стандартный образец площади окрашен, например, в белый цвет, а вспомогательная площадка – в чёрный. При анализе цветных изображений между цветами стандартного образца и вспомогательной площадки должен быть максимальный цветовой контраст. Обязательным требованием к вспомогательной контрастирующей форме является условие – минимальная ширина изображения граничной полосы, образующейся при наложении стандартного образца площади на вспомогательную контрастирующую площадку, должна быть не менее l пикселей, где l – выбираемый параметр. Назовём образцом комплект стандартного образца площади и вспомогательной контрастирующей площадки. Для получения качественного изображения объект испытаний должен подсвечиваться источником светового излучения, обеспечивающим максимальный контраст оптической неоднородности относительно окружающего фона. Для обеспечения качественной калибровки образец накладывается непосредственно на объект испытаний. При невозможности наложения на объект формируется отдельное фотоизображение образца на произвольной плоской площадке (имитатор) с такой же ориентацией относительно фоторегистратора, как и в случае формирования изображения объекта. Аналогичные требования выдвигаются и к расстоянию от фоторегистратора до имитатора.

На рисунке приведена геометрическая схема формирования фотографического изображения объекта испытаний с оптической неоднородностью: 1 – объект испытаний; 2 – оптическая неоднородность; 3 – стандартный образец площади; 4 – вспомогательная контрастирующая площадка; 5 – источник света; 6 – фоторегистратор; 7 – фотоматрица (собственно изображение).

Свяжем систему координат $X'O'Y'$ с поверхностью объекта испытаний со стороны фоторегистратора, а систему координат XOY – с плоскостью оптического изображения. Лобовая поверхность матрицы фоторегистратора является плоской и ограничена прямоугольником. Оси x и y параллельны соответствующим сторонам указанного прямоугольника. Для удобства направим оси x' и x в противоположные стороны. Таким же образом поступим и с осями y' и y . Пусть отрезок OO' перпендикулярен поверхности объекта и плоскости изображения. Оптический центр O'' фоторегистратора принадлежит OO' . Геометрическая схема формирования оптического изображения характеризуется рядом параметров: расстоянием от объекта испытаний до оптического центра объектива фоторегистратора $O'O'' = F$; расстоянием от оптического центра объектива фоторегистратора до плоскости изображения $O''O = f$; размером поля изображения $A \times B$; размером фотоматрицы $a \times b$. Следует также учесть диаметр стандартного образца площади C , диаметр вспомогательной контрастирующей площадки D ; размер изображения стандартного образца площади c , размер изображения вспомогательной контрастирующей площадки d .



Геометрическая схема формирования изображения оптической неоднородности и образца

Для идеальной изображающей системы геометрические параметры объекта испытаний A, B, C, D связаны с геометрическими параметрами изображения объекта a, b, c, d простейшими соотношениями

$$\frac{A}{a} = \frac{B}{b} = \frac{C}{c} = \frac{D}{d} = \frac{F}{f}. \quad (1)$$

Назовём отношение f/F коэффициентом линейного преобразования k .

Замечание 1. Соотношения (1) справедливы для бесконечно малого размера точки изображения. В реальности каждый элемент фотоматрицы, соответствующий пикселю оптического изображения, имеет конечные размеры $r_x \times r_y$.

Для обоснования возможности оценки площади оптической неоднородности по оптическому изображению необходимо проверить соблюдение двух базовых принципов – принципов физической и технической реализуемости.

Физическая реализуемость. Принцип физической реализуемости заключается в наличии физической закономерности, связывающей измеряемую физическую величину с оцениваемым параметром объекта испытаний.

В рассматриваемой задаче измеряемой физической величиной является площадь изображения оптической неоднородности s , а оцениваемым параметром объекта испытаний – площадь оптической неоднородности на поверхности объекта S .

Пусть на поверхности объекта имеется оптическая неоднородность, представляющую собой односвязную непустую область Q' , граница которой FrQ' описывается следующим образом:

$$FrQ' = \{(x', y'), q(x', y') = 0\}, \quad (2)$$

где $q(x', y')$ – некоторая непрерывная функция.

Площадь оптической неоднородности $Q' - S$ находится с помощью выражения

$$S = \int_{Q'} dx' dy'. \quad (3)$$

Не теряя общности, можно допустить параллельность осей $O'X'$, OX и $O'Y'$, OY . Это допущение является естественным в том случае, если поле зрения объектива фоторегистратора является частью поверхности испытуемого объекта.

Найдём площадь изображения оптической неоднородности s . Для этого необходимо связать принадлежащую поверхности объекта испытаний точку с координатами (x', y') с соответствующей точкой изображения с координатами (x, y) . С учётом выражений (1) получим

$$x = kx' \quad y = ky'. \quad (4)$$

Из анализа равенств (4) и выражения (3) следует, что площадь изображения оптической неоднородности s находится по формуле

$$s = k^2 S. \quad (5)$$

Формула (5) является искомой физической закономерностью. Задачей является определение коэффициента преобразования k и площади изображения оптической неоднородности на цифровом оптическом изображении. Коэффициент преобразования k находится на стадии калибровочных линейных измерений или измерений площади по стандартным образцам площади.

Техническая реализуемость. Принцип технической реализуемости заключается в наличии технических средств, позволяющих провести измерения с заданной точностью в заданное время. Применительно к рассматриваемой задаче проверка соблюдения принципа технической реализуемости сводится к оценке точности измерения s . В анализируемом случае к измерительным

средствам относятся: стандартный образец площади со вспомогательной контрастирующей площадкой, источник света и фоторегистратор.

Для обоснования технической реализуемости фотографического метода оценки площади необходимо подобрать размеры стандартного образца площади, вспомогательной контрастирующей площадки и фоторегистратор.

Выше подчёркнуто, что основная рекомендация по подбору размеров стандартного образца площади заключается в том, что размер сопоставим с максимально возможным размером оптической неоднородности. Размер вспомогательной контрастирующей площадки должен быть таким, чтобы внешняя контрастная полоса была шириной не менее l пикселей.

В матрице фоторегистратора формируется цифровое полутоновое или цветное изображение. Оптическая неоднородность на изображении объекта испытаний отличается от фона полутоновым или цветным контрастом. Погрешность определения площади s обуславливается тремя главными факторами – геометрическим, шумовым и алгоритмическим. Геометрический фактор связан с тем, что границы изображения неоднородности не совпадают с физическими границами пикселей, поэтому яркость или цветность в граничных пикселях изображения оптической неоднородности отличаются от яркости или цветности внутренних пикселей изображения. Шумовой фактор связан с флуктуациями яркости или цветности в элементах изображения оптической неоднородности. Влияние шумового фактора на точность определения площади s тем больше, чем меньше уровень яркости или цветности. Алгоритмический фактор связан с алгоритмом обработки изображения видимой фоторегистратором части поверхности объекта испытаний. Алгоритм должен минимизировать систематическую погрешность оценки площади изображения оптической неоднородности, вызванной геометрическим и шумовым факторами.

Алгоритм обработки изображения

На выходе алгоритма должна быть получена оценка площади изображения оптической неоднородности s . Изображение на выходе фоторегистратора представляет собой матрицу размерами $M \times N$, $M < N$, где M – число строк, а N – число столбцов. Индекс m , $m = 1 - M$ соответствует строке изображения, а индекс n , $n = 1 - N$ – столбцу. Элемент матрицы характеризуется вектором $\mathbf{p}$. Для полутонового изображения – одномерным вектором (яркостью f), т. е. $\mathbf{p} = f$. Для цветного изображения – трёхмерным вектором, например, в системе $RGB - (r, g, b)$, т. е. $\mathbf{p} = (r, g, b)$. Параметры f, r, g, b принимают значения из интервала от 0 до 255, всего 256 полутонов, «0» соответствует самому тёмному тону цвета, «255» соответствует чистому цвету. Выше сказано, что оптическая неоднородность отличается по оттенку серого (оттенку цвета) от окружающего фона. Это и является критерием отнесения исследуемой точки к оптической неоднородности. Подбором источника светового излучения и способа подсветки достигается максимальный контраст (цветовой контраст).

Аналогично подходу, изложенному в [4, 14–16], в первом приближении оценка площади s находится по формуле

$$S \approx s_{\text{pix}} \sum_{(m,n) \in A} 1, \quad (6)$$

где $s_{\text{pix}} = r_x \times r_y$ – площадь единичного пикселя в метрических единицах; множество точек A определяется соотношением

$$A = \{(m, n); K(p_{mn}, p_f) > K_{\text{lim}}\}, \quad (7)$$

где p_{mn} – вектор значений, соответствующий элементу матрицы с координатами (m, n) ; p_f – вектор значений для фона; $K(p_{mn}, p_f)$ – числовой положительный вектор для формализации критерия отнесения исследуемой точки к оптической неоднородности; K_{lim} – вектор предельных значений для критерия. В выражении (7) под сравнением векторов $K(p_{mn}, p_f) > K_{\text{lim}}$ понимается сравнение их координат.

Наиболее просто критерий отнесения исследуемой точки к оптической неоднородности формализуется для полутоновых изображений

$$K(p_{mn}, p_f) > K_{\text{lim}} \Leftrightarrow |f_{mn} - f_f| > K_{\text{lim}} = \Delta f, \quad (8)$$

где Δf – число градаций серого для отличия яркости оптической неоднородности и яркости фона f_f .

Для цветных изображений формализация критерия описывается следующим соотношением

$$K(p_{mn}, p_f) > K_{\text{lim}} \Leftrightarrow \begin{cases} |r_{mn} - r_f| > r_{\text{lim}} = \Delta r, \\ |g_{mn} - g_f| > g_{\text{lim}} = \Delta g, \\ |b_{mn} - b_f| > b_{\text{lim}} = \Delta b. \end{cases} \quad (9)$$

Значения предельно возможных отклонений красного Δr , жёлтого Δg и голубого Δb могут существенно отличаться друг от друга. В соотношении (9) r_f, g_f, b_f – цветовые координаты фона.

Значения параметров $\Delta f, \Delta r, \Delta g, \Delta b$ выбираются экспериментальным путём на стадии предварительных испытаний применительно к конкретной измерительной задаче. В работе [4] оценивалась площадь светлого маяка на тёмном фоне. Расстояние от фоторегистратора до контрастного маяка варьировали от 1 до 3 м. Уровень светлого для точек, принадлежащих маяку, был не меньше 230 для естественного освещения (ясно, мелкая облачность) и 150 для искусственного освещения (лампы накаливания общей мощностью 200 Вт). Уровень тёмного фона не превысил 41 для естественного освещения и 24 для искусственного освещения. Для отнесения пикселя к контрастному маяку оказалось достаточно $\Delta f = 30$ при флуктуирующем естественном освещении (мелкая облачность) и $\Delta f = 10$ при искусственном освещении.

Замечание 2. В случае применения анализируемого способа в системах управления сложным движением оптические неоднородности – маяки [4] создаются целенаправленно, поэтому логично выбирать чистые цвета для упрощения критерия (8.2) и увеличения точности оценки искомой площади.

Замечание 3. Для решения задачи, указанной в замечании 2, проектировщики вольны в выборе формы оптической неоднородности. Поэтому логично использовать оптические неоднородности правильной формы – круг, квадрат и т. п. Указанные объекты являются выпуклыми, и это означает, что если точка $C_1 = (m_1, n_1) \in \mathbf{A}$ и точка $D_2 = (m_2, n_2) \in \mathbf{A}$, то любая точка $X_3 = (m_3, n_3)$, расстояние от которой до отрезка C_1D_2 меньше половины физического размера пикселя, также принадлежит множеству $\mathbf{A}$ [4].

Влияние геометрического фактора, описанного выше, на точность оценки площади по формуле (6) может оказаться существенным. В работах [4, 16] для компенсации влияния геометрического фактора на точность оценки s предложено учесть все точки изображения, которые граничат с множеством $\mathbf{A}$. Их совокупность выше обозначена через $Fr\mathbf{A}$. Если для полутонового изображения точка $(m, n) \in Fr\mathbf{A}$, то её вклад в оценку площади [4] равен $\Delta_{mn} = (f_{mn} - f_f) / (f_0 - f_f)$, здесь f_0 – среднее значение яркости по внутренней области оптической неоднородности. В работе [16] поправочный коэффициент вычисляется без учёта различия яркостей граничных и приграничных пикселей. Для цветного изображения ситуация с вычислением вклада Δ_{mn} может оказаться более сложной, но тем не менее значение Δ_{mn} может быть оценено по результатам анализа цветовых координат граничного и фонового пикселей.

Учёт вкладов граничных элементов множества $\mathbf{A}$ позволяет модернизировать формулу (6) для оценки площади оптической неоднородности

$$s \approx s_{\text{pix}} \left(\sum_{(i,j) \in \mathbf{A}} 1 + \sum_{(i,j) \in Fr\mathbf{A}} \Delta_{mn} \right). \quad (10)$$

Очевидно, что формула (10) даёт более точное по сравнению с (6) приближение площади оптической неоднородности на испытуемом объекте. Для чёрно-белого изображения условия правильности измерений площади s , то есть близости систематической погрешности измерений к нулю, сводятся к ряду ограничений: первое – число полутонов велико; второе – значение $f_0 - f_f$ велико; третье – флуктуации яркости в пикселях изображения отсутствуют. На практике остаточная систематическая погрешность оценки (10) обуславливается малым числом полутонов, возможным слабым контрастом оптической неоднородности и шумами в изображении. Исследование влияния указанных и других факторов на точность измерения площади оптической неоднородности выходит за рамки предлагаемой работы.

Заключение

В статье обоснована возможность измерения площади оптической неоднородности на поверхности объекта неразрушающих испытаний на основе анализа цифровых изображений с высокой точностью. Предложен алгоритм обработки цифровых полутоновых и цветных изображений. Способ измерения площади оптических неоднородностей может быть применён в различных отраслях науки, в строительстве, в коммунальном хозяйстве, в промышленности, на транспорте, в системах управления сложным движением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садеков, Р.Н. Определение дальности до объекта на основе анализа его изображений / Р.Н. Садеков // Известия института инженерной физики. – 2010. – Т. 2. – № 16. – С. 65–67.
2. Бачевский, С.В. Точность определения дальности и ориентации объекта методом пропорции в матричных телевизионных системах / С.В. Бачевский // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2010. – № 1. – С. 57–66.
3. Старовойтов, Е.И. Использование геометрических искажений изображения, формируемого КМОП-фотоприемником, для контроля скорости сближения космических аппаратов / Е.И. Старовойтов, Д.В. Савчук // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 2. – С. 66–68.
4. Способ определения параметров торможения лифтов и подъёмников на основе анализа потока фотоизображений / С.П. Осипов, М.Ю. Попов, Р.В. Федяев, А.А. Косач // Технологии технологической безопасности: Интернет-журнал. – 2011. – Вып. 4 (38). – 10 с. – Условия оступа : <http://ipb.mos.ru/ttb>.
5. Hassabo, A.I. Semi-Automatic Area measurement of irregular two dimensional shapes in digital images / A.I. Hassabo // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – V. 170. – P. 2953–2961.
6. Zhao, P. Precise curved surface area measurement with a light-pen vision measurement system / P. Zhao, G.Q. Ni // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. – 2010. – V. 121. – № 20. – P. 1848–1852.
7. Кондратов, В.Т. Проблемы измерения площадей нанообъектов / В.Т. Кондратов, К.А. Демченко // Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники. – Киев, 2011. – С. 57–65.
8. Терехов, А.Г. Сопоставление землеустроительных и спутниковых данных IRS LISS о размерах полей в Северном Казахстане / А.Г. Терехов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5. – № 2. – С. 358–363.
9. Мигун, Н.П. Тепловые воздействия при капиллярном неразрушающем контроле / Н.П. Мигун, А.Б. Гнусин. – Минск : Беларус. нувука, 2014. – 131 с.
10. Брыксина, Н.А. Исследование точности дистанционного измерения площадей озёр с использованием космических снимков / Н.А. Брыксина, Ю.М. Полищук // Геоинформатика. – 2013. – № 1. – С. 64–68.
11. Muad, A.M. Super-resolution mapping of lakes from imagery with a coarse spatial and fine temporal resolution / A.M. Muad, G.M. Foody // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2012. – V. 15. – P. 79–91.
12. Жолобова, О.А. Производственный контроль качества каменных стен и других ограждающих конструкций зданий по фотографическим изображениям / О.А. Жолобова // Вестник МГСУ. – 2013. – № 11. – С. 234–240.
13. McCormick, N. Optical imaging for low-cost structural measurements / N. McCormick, P. Waterfall, A. Owens // Proceedings of the ICE-Bridge Engineering. – 2013. – V. 167. – No. 1. – P. 33–42.
14. Single leaf area measurement using digital camera image / B. Chen, Z. Fu, Y. Pan, J. Wang, Z. Zeng // Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. – Berlin : Heidelberg : Springer, 2011. – P. 525–530.
15. Корнилов, Ф.А. Поиск структурных различий изображений: алгоритмы и методы исследования / Ф.А. Корнилов // Машинное обучение и анализ данных. – Т. 1. – № 7. – С. 902–919.
16. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Барталёв, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыщенко, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – № 2. – С. 343–351.

REFERENCES

1. *Sadekov R.N.* Opredelenie dalnosti do ob'ekta na osnove analiza ego izobrazheniy [Object range determination based on its image analysis]. *Izvestiya instituta inzhenernoy fiziki*. 2010. V. 2. No. 16. Pp. 65–67. (rus)
2. *Bachevskiy S.V.* Tochnost opredeleniya dalnosti i orientatsii ob'ekta metodom proporsii v matrichnykh televizionnykh sistemakh [Accuracy of object range and orientation determination by proportion method in matrix-assisted TV systems]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2010. No. 1. Pp. 57–66. (rus)
3. *Starovoytov E.I., Savchuk D.V.* Ispolzovanie geometricheskikh iskazheniy izobrazheniya, formiruемого KMOP-fotopriemnikom, dlya kontrolya skorosti sblizheniya kosmicheskikh apparatov [Image geometric distortion formed by CMOS photodetector used for spacecraft closing speed control]. *Mechatronics, Automation, Control*. 2014. No. 2. Pp. 66–68. (rus)
4. *Osipov S.P., Popov M.Yu., Fedyaev R.V., Kosach A.A.* Sposob opredeleniya parametrov tormozheniya liftov i pod'yomnikov na osnove analiza potoka fotoizobrazheniy [Determination of lift and elevator braking parameters based on photographic image flow]. *Tehnologii tehnosfernoy bezopasnosti: Internet-zhurnal*. 2011. No. 4. 10 p. (rus)
5. *Hassabo A.I.* Semi-automatic area measurement of irregular two dimensional shapes in digital images. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. V. 170. Pp. 2953–2961.
6. *Zhao P., Ni G.Q.* Precise curved surface area measurement with a light-pen vision measurement system. *Optic-International Journal for Light and Electron Optics*. 2010. V. 121. No. 20. Pp. 1848–1852.
7. *Kondratov V.T., Demchenko K.A.* Problemy izmereniya ploschadey nanoob'ektov [Measurement of nano-object areas]. *Girotehnologii, navigatsiya, upravlenie dvizheniem i konstruirovaniye aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki*. Kiev, 2011. Pp. 57–65. (rus)
8. *Terehov A.G.* Sopostavlenie zemleustroitelnykh i sputnikovyykh dannykh IRS LISS o razmerah poley v Severnom Kazakhstane [Comparison of land use and satellite data IRS LISS on field size in Northern Kazakhstan]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2008. V. 5. No. 2. Pp. 358–363. (rus)
9. *Migun N.P., Gnusin A.B.* Teplovyie vozdeystviya pri kapillyarnom nerazrushayuschem kontrole [Thermal effects at capillary non-destructive testing]. Minsk : Belarus. nuvuka, 2014. 131 p. (rus)
10. *Bryiksina N.A., Polischuk Yu.M.* Issledovanie tochnosti distantsionnogo izmereniya ploschadey ozer s ispolzovaniem kosmicheskikh snimkov [Remote measurement accuracy of lake areas using space images]. *Geoinformatika*. 2013. No. 1. Pp. 64–68. (rus)
11. *Muad A.M., Foody G.M.* Super-resolution mapping of lakes from imagery with a coarse spatial and fine temporal resolution. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. V. 15. Pp. 79–91.
12. *Zholobova O.A.* Proizvodstvennyy kontrol kachestva kamennykh sten i drugih ograzhdayuschiy konstruksiy zdaniy po fotograficheskim izobrazheniyam [Manufacturing quality control of stone walls and other enclosing structures of buildings based on photographic images]. *Vestnik MGSU*. 2013. No. 11. Pp. 234–240. (rus)
13. *McCormick N., Waterfall P., Owens A.* Optical imaging for low-cost structural measurements. *Proc. ICE-Bridge Engineering*. 2013. V. 167. No. 1. Pp. 33–42.
14. *Chen B., Fu Z., Pan Y., Wang J., Zeng Z.* Single leaf area measurement using digital camera image. *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*. Berlin : Heidelberg : Springer, 2011. Pp. 525–530.
15. *Kornilov F.A.* Poisk strukturnykh razlichy izobrazheny: algoritmy i metody issledovaniya [Detection of structural differences in images: algorithms and research methods]. *Mashinnoye obucheniye i analiz dannykh*. V. 1. No. 7. Pp. 902–919. (rus)
16. *Bartalev S.A., Yegorov B.A., Yefremov B.Yu., Lupyan Ye.A., Stytsenko F.B., Flitman Ye.B.* Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ [Fire areas assessment based on satellite data integration of sampling resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. No. 2. Pp. 343–351. (rus)