

УДК 533.6.08

ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ФОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ*

Ф. Boden¹, Т. Kirmse¹, А. Ю. Поройков², Б. С. Ринкевичюс²,
Н. М. Скорнякова², И. А. Шашкова²

¹*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Bunsenstr. 10, 37073, Goettingen, Germany*

²*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14
E-mail: rinkevbs@mail.ru*

Представлены результаты теоретических и лабораторных экспериментальных исследований метода корреляции фоновых изображений. Показана зависимость влияния угла наблюдения на полученные результаты. Рассмотрена возможность применения метода корреляции фоновых изображений к полётным испытаниям.

Ключевые слова: метод корреляции фоновых изображений, полётные измерения, динамические деформации.

Введение. Метод корреляции фоновых изображений (МКФИ) является сравнительно новым методом, предназначенным для диагностики динамических деформаций [1]. Теоретические основы данного метода подробно рассмотрены в [2]. Все аспекты его применения в настоящее время ещё не изучены.

Данный метод базируется на современных алгоритмах цифровой обработки изображений и позволяет проводить исследования по визуализации и диагностике деформаций поверхности летательного аппарата в натуральных экспериментах. Для определения деформации объекта на исследуемые участки поверхности наносится специальное структурированное изображение (фоновый экран), зачастую состоящее из точек, расположенных на нём с заданными параметрами распределения. Для каждого конкретного случая фоновый экран подбирается согласно параметрам экспериментальной установки: расстоянию до исследуемого объекта, требуемому размеру поля зрения, амплитуде деформаций и т. п.

С помощью цифровой камеры делают снимки фонового экрана до и после деформации. Обработка полученных изображений экрана кросскорреляционными алгоритмами в специализированных программах позволяет визуализировать деформации поверхности исследуемого объекта с использованием векторного поля определённых смещений или поля коэффициента корреляции [3, 4]. Для реализации МКФИ необходимы нанесённый на исследуемый объект фоновый экран, видеокамера, программа обработки изображений и возможность проведения натуральных испытаний [5, 6].

В натуральных полётных испытаниях нельзя установить регистрирующую аппаратуру строго перпендикулярно объекту исследования. Например, при диагностике состояния крыльев самолёта или пропеллера вертолётной конструкции летательных аппаратов позволяют получить максимальный угол между направлением наблюдения ви-

*Работа выполнена при поддержке Евросоюза (7-я Рамочная программа, проект AIM²).

деокамеры и плоскостью объекта не более 30° , что вносит значительные погрешности в результаты.

Целью данного исследования является определение влияния расположения исследуемой поверхности относительно видеокамеры на точность измерений и выявление мероприятий, позволяющих её повысить.

Теоретические исследования. В полётных экспериментах угол между перпендикулярно расположенной плоскостью предмета и направлением наблюдения очень малый. Для того чтобы установить, какое влияние оказывает величина угла между исследуемой плоскостью и плоскостью изображения на точность получаемого изображения, нужно построить математическую модель формирования изображения, которое в оптических системах происходит с помощью перспективной проекции [7].

Схема такой проекции представлена на рис. 1. Здесь точка наблюдения B экрана проектируется в точку изображения E . Начало системы координат камеры расположено в точке O . Прямая FA является оптической осью системы. Она пересекает заднюю, переднюю и предметную плоскости в точках F, C и A соответственно. Координата точки B в системе координат предметной области есть точка x_c . Координатой точки E в системе координат камеры является x_i . Расстояние от центра объектива до предметной плоскости равно z_c . Фокусное расстояние объектива f . Точка D — проекция точки B на переднюю плоскость изображения.

Из подобия треугольников OFE и OAB следует, что

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x_c}{z_c}. \quad (1)$$

Таким образом, действительная координата точки E на двухмерном изображении рав-

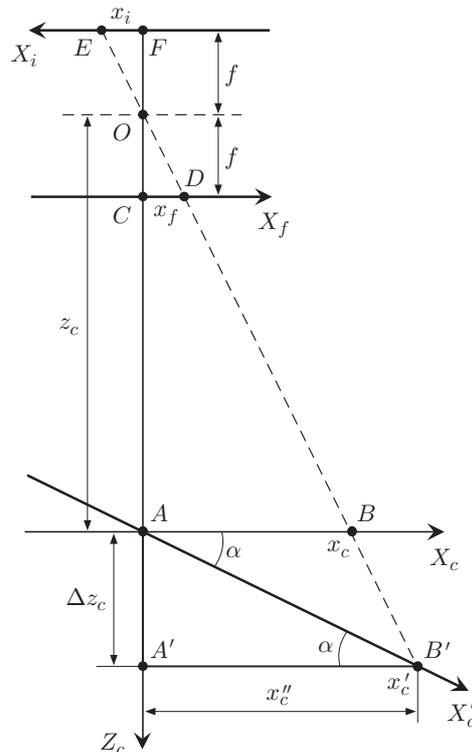


Рис. 1. Геометрическая схема перспективной проекции с параллельным и непараллельным расположением исследуемой поверхности

на пространственной координате точки B , взятой в масштабе, равном отношению фокусного расстояния к расстоянию до объекта.

При дальнейшем построении математической модели удобно будет рассматривать формирование изображения не в действительной плоскости изображения, которая находится позади объектива, а в передней. Из подобия треугольников OFE и OCD следует, что

$$\frac{x_f}{f} = \frac{x_c}{z_c}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что размеры изображений объектов на этих двух плоскостях будут совпадать, но в передней плоскости они не будут зеркально отображены относительно реальных предметов.

На рис. 1 представлена простая схема перспективной проекции, в которой предметная плоскость параллельна плоскости изображения, и рассматривается только проекция относительно одной координаты. Как отмечалось выше, в натуральных экспериментах невозможно реализовать такую схему. В большинстве случаев исследуемая плоскость находится под некоторым углом к плоскости изображения. Поэтому необходимо рассмотреть более сложную схему проективной проекции. В этой схеме добавим дополнительную ось X'_c , которая соответствует исследуемой поверхности, наклонённой под углом α к плоскости изображения. Рассматриваемая точка на исследуемой поверхности находится в точке B' . Она, как и в простой схеме, проецируется в точку E на задней плоскости изображения и в точку D на передней плоскости изображения. Однако в системе координат исследуемой поверхности координата x'_c не совпадает с координатой x_c .

Для того чтобы связать координаты точки B' с координатами точки E , необходимо внести дополнения. Используем оптическую ось для построения прямоугольного треугольника $AA'B'$. Углы BAB' и $AB'A'$ равны. Тогда можно выразить длину катета AA' как

$$\Delta z_c = x'_c \sin \alpha. \quad (3)$$

Аналогично выразим длину катета $A'B'$:

$$x''_c = x'_c \cos \alpha. \quad (4)$$

Теперь по формуле (1) можно записать выражение для треугольника OFE и достроенного треугольника $OA'B'$:

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x''_c}{z_c + \Delta z_c}. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) выражения (3) и (4), получим следующее соотношение:

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x'_c \cos \alpha}{z_c + x'_c \sin \alpha}. \quad (6)$$

Преобразуя формулу (6), получим окончательную формулу, связывающую координаты точек на исследуемой поверхности с координатами точек на плоскости изображения при проективной проекции:

$$x_i = \frac{x'_c f \cos \alpha}{z_c + x'_c \sin \alpha}. \quad (7)$$

Используя это выражение, можно построить график зависимости координат точек на изображении от координат точек на исследуемой поверхности. Из построенных графиков видим, что при угле между плоскостью изображения и исследуемой поверхностью, равном нулю ($\alpha = 0$), зависимость носит линейный характер. Этот случай соответствует перспективной проекции, показанной на рис. 1 или представленной формулой (7), которая при подстановке $\alpha = 0$ превращается в (1).

При угле между плоскостью изображения и исследуемой поверхностью равном 30° ($\alpha = 30^\circ$) зависимость носит уже более сложный характер, причём она несимметрична относительно оптической оси. При возрастании угла α до 80° зависимость становится всё более полой. В предельном случае, когда $\alpha = 90^\circ$, зависимость будет представлять собой горизонтальную линию.

Рассмотренная зависимость позволяет отметить две проблемы, возникающие при съёмке исследуемой поверхности под большим углом. Первая из них заключается в нелинейной зависимости координат точек изображения от координат точек исследуемой поверхности. Таким образом, для получения достоверного результата измерений и уменьшения погрешности необходимо проводить процедуры калибровки и дальнейшей деформации исходного изображения в целях исключения нелинейности. Вторая проблема связана с ограничением пространственного разрешения изображений при больших углах α .

Рассмотрим зависимость пространственного разрешения на изображениях от угла между исследуемой поверхностью и плоскостью изображения. Пространственное разрешение зависит от размеров светочувствительной матрицы и пикселей этой матрицы. Для его расчёта определим, какая длина пространства изображения приходится на единицу длины предметного пространства. Для этого продифференцируем выражение (7) по x'_c :

$$\frac{dx_i}{dx'_c} = \frac{f \cos \alpha}{z_c + x'_c \sin \alpha} - \frac{x'_c f \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{(z_c + x'_c \sin \alpha)^2}. \quad (8)$$

Теперь, разделив полученное выражение на размер одного пикселя светочувствительной матрицы приёмника, имеем для пространственного разрешения

$$S = \frac{1}{a} \left[\frac{f \cos \alpha}{z_c + x'_c \sin \alpha} - \frac{x'_c f \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{(z_c + x'_c \sin \alpha)^2} \right], \quad (9)$$

где a — размер одного пикселя.

Используя формулу (9), можно построить зависимость пространственного разрешения изображения от угла наклона исследуемой поверхности к плоскости изображения (рис. 2). Из рисунка видно, что эта зависимость имеет нелинейный характер, причём сильно различается для разных значений координаты x'_c . При нулевом значении угла α чувствительность одинакова для любых значений координаты x'_c , так как исследуемая поверхность находится параллельно плоскости изображения. При увеличении угла α точки с отрицательными значениями координат x'_c приобретают большее пространственное разрешение. Для точек, расположенных в положительной области, наоборот, разрешение уменьшается. Это объясняется тем, что при одном и том же значении координаты x'_c с увеличением угла α точка всё дальше удаляется от объектива.

Построим зависимость пространственного разрешения изображения от координаты точки x'_c (рис. 3). Видно, что разрешение резко падает с увеличением угла, не сильно меняясь при изменении координаты x'_c . Чем больше угол α , тем меньше изменение пространственного разрешения по мере увеличения координаты z_c . В случае нулевого угла ($\alpha = 0$) разрешение остаётся одинаковым для всего поля изображения.

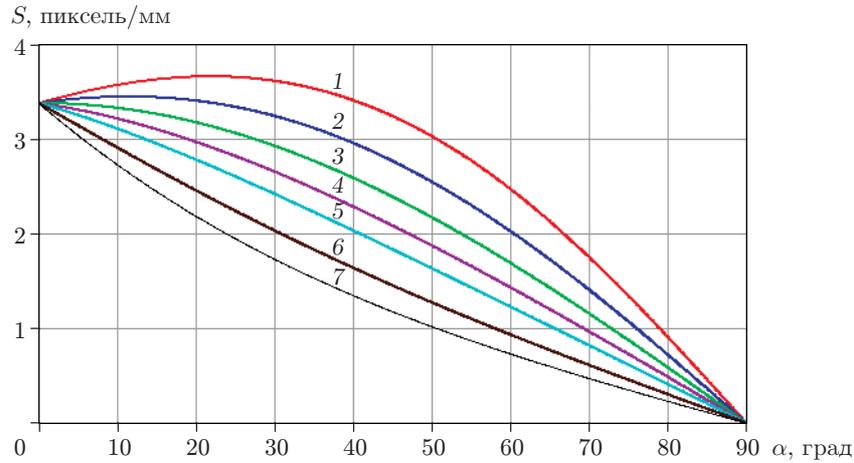


Рис. 2. График зависимости пространственного разрешения изображения от угла наклона исследуемой поверхности к плоскости изображения при $f = 50$ мм, $z_c = 2$ м, $a = 7,4$ мкм ($x'_c = -400$ (кривая 1), -200 (2), 0 (3), 200 (4), 400 (5), 1200 мм (7), $x''_c = 800$ мм (6))

Построим зависимость пространственного разрешения S от расстояния между центром объектива и плоскостью изображения z_c (рис. 4). Из рисунка хорошо видно, что при увеличении угла α пространственное разрешение уменьшается, а зависимость от расстояния до объекта становится более резкой.

В заключение теоретических исследований влияния пространственных параметров приёмной системы на статистические характеристики МКФИ рассмотрим ещё один параметр — глубину резко изображаемого пространства. Данный параметр важен при малых углах между оптической осью камеры и плоскостью фонового экрана. В большинстве экспериментов числовые апертуры выбирают минимально возможными для получения максимально яркого изображения исследуемой поверхности без засветки. Однако если поверхность не перпендикулярна оптической оси камеры, то при малой численной апертуре глу-

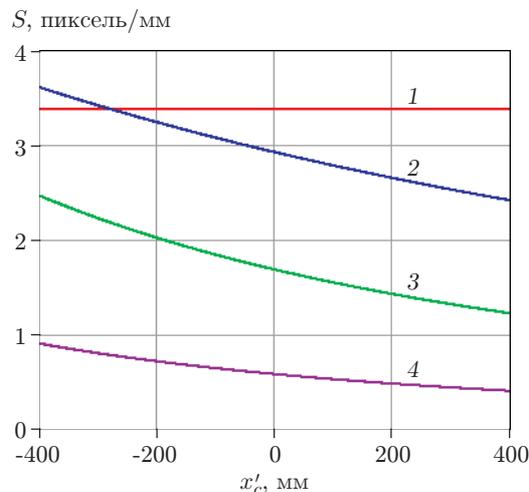


Рис. 3. График зависимости пространственного разрешения изображения от координаты на исследуемой поверхности при $f = 50$ мм, $z_c = 2$ м, $a = 7,4$ мкм ($\alpha = 0$ (кривая 1), 30 (2), 60 (3), 80° (4))

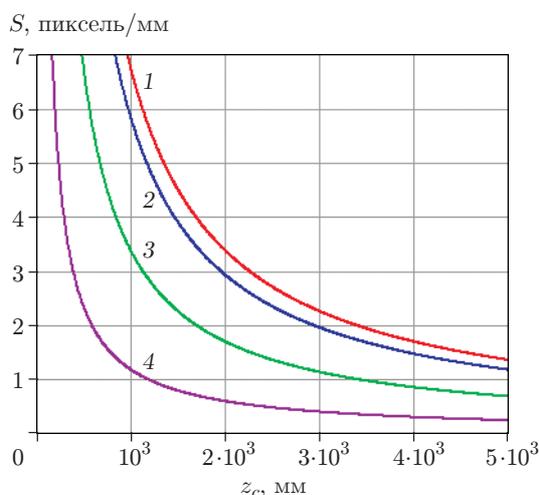


Рис. 4. График зависимости пространственного разрешения изображения от расстояния до исследуемой поверхности при $f = 50$ мм, $z_c = 2$ м, $a = 7,4$ мкм (значения для кривых, как на рис. 3)

бина резко изображаемого пространства будет слишком малой и не вся плоскость резко отображается на получаемых изображениях. Таким образом, появляется необходимость увеличивать численную апертуру, уменьшая тем самым яркость изображений и повышая погрешность измерений. Поэтому выбор оптимальных параметров числа апертуры, освещённости (если есть возможность изменять данный параметр в эксперименте), экспозиции и скорости съёмки является сложной задачей и должен проводиться для каждого отдельного эксперимента.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований влияния величины угла между плоскостью камеры и предметной плоскостью на точность получаемых результатов была разработана специальная установка, схема которой представлена на рис. 5. Фоновый экран закреплён на устройстве смещения, снабжённом микрометрическим винтом и индикаторной головкой, позволяющими контролировать смещение с погрешностью до 1 мкм. Угол между оптической осью видеокамеры и плоскостью фонового экрана, который дополняет угол между плоскостью светочувствительной матрицы и предметной плоскостью до 90° , контролируется с помощью цифрового угломера с погрешностью до $0,1^\circ$. Созданная установка позволяет с высокой точностью и повторяемостью устанавливать параметры проведения экспериментов.

Методика проведения экспериментальных исследований заключается в регистрации серии изображений фонового экрана при разных его смещениях. При этом различные серии отличаются величиной угла между оптической осью цифровой видеокамеры, используемой в установке, и плоскостью фонового экрана.

Для каждой серии с помощью программного обеспечения выполняется сохранение изображений фонового экрана без смещения и последовательно со смещением по горизонтали от 10 до 1050 мкм. Эксперимент проводится для нескольких углов ($90^\circ - \alpha$) из диапазона, соответствующего малым углам 5, 10, 15 и 20° . На фоновые экраны были нанесены специальные калибровочные метки с известным расстоянием между ними. Поэтому, используя реальное расстояние между метками и расстояние между ними на изображении в пикселях, возможно проводить автоматический расчёт результатов обработки в реальных единицах измерения.

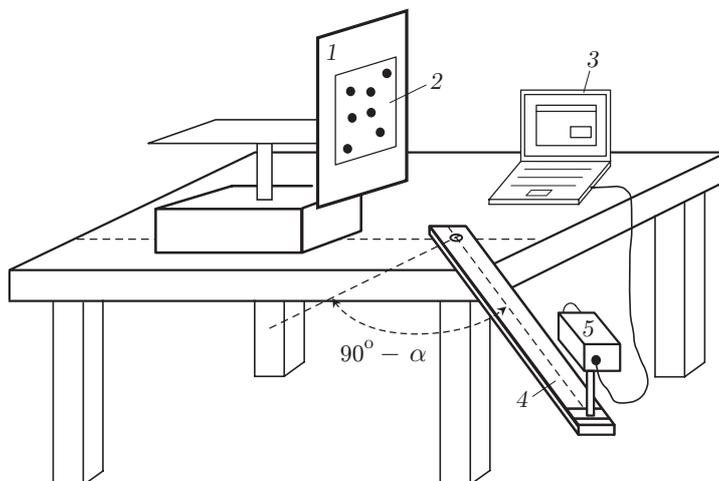


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 — устройство смещения фонового экрана, 2 — фоновый экран, 3 — персональный компьютер с программным обеспечением, 4 — устройство поворота камеры 5 — цифровая камера

Полученные последовательности изображений обрабатываются в специализированной программе PIVview [8], которая позволяет проводить кросскорреляционную обработку изображений с различными параметрами, основными из которых являются размер окна опроса и шаг деления изображения на окна опроса. Результат выводился в виде векторного поля определённых программой смещений и затем сравнивался со смещением, которое было установлено с помощью микрометрического винта и индикаторной головки устройства смещения фонового экрана. Относительная погрешность измеряемых смещений определялась как

$$\delta d_{\text{rnd}} = \frac{\Delta d}{d_{\text{true}}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где $\Delta d_{\text{rnd}} = d_{\text{meg}} - d_{\text{true}}$; d_{true} — истинное значение, на которое производилось смещение с помощью микрометрического винта и индикаторной головки (d_{meg} — полученное значение смещения при обработке). Зависимость относительной погрешности измерений от угла между оптической осью камеры и плоскостью фонового экрана показана на рис. 6. На графиках хорошо заметна тенденция к уменьшению относительной погрешности при увеличении угла между ними.

Как следует из теоретических исследований, уменьшение угла α приводит к уменьшению нелинейности в пространственном разрешении изображений и росту самого пространственного разрешения, что, в свою очередь, влечёт за собой снижение погрешности определяемых значений смещения при кросскорреляционной обработке.

Экспериментальные результаты подтверждают эти выводы. В области малых смещений (от 0 до 100 мкм) обработка экспериментальных данных в любых случаях не позволяет получить удовлетворительные результаты из-за большого разброса значений погрешности δd в диапазоне от 10 до 100 %. На практике измерения при углах больших 80° без применения специальных приёмов по повышению точности измерений проводить также нельзя.

В ходе проведения экспериментальных исследований выявлены следующие проблемы, влияющие на результаты измерений. Первая заключается в недостатке глубины резкости изображений, вызванном малыми углами между оптической осью камеры и плоскостью фонового экрана. Это приводит к ухудшению результатов обработки экспериментальных

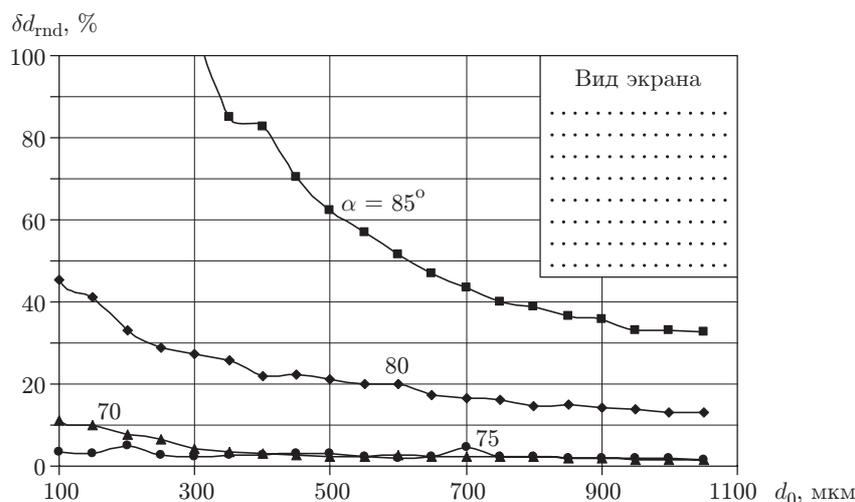


Рис. 6. Графики зависимости относительной погрешности величины смещения экранов $\delta d_{\text{rнд}}$ от величины реального смещения d_0 при различных углах α

данных. Одно из решений такой проблемы заключается в создании дополнительного мощного освещения и работе с минимальными значениями диафрагменных чисел, что позволяет получать большую глубину резкости на фиксируемых камерой изображениях при ещё достаточной освещённости самого фонового экрана. Вторая проблема, связанная с получением изображения камерой, расположенной под малыми углами, — сильное искажение структуры фоновых экранов. Это затрудняет обработку экспериментальных результатов. Частично данная проблема решается подбором оптимального рисунка фонового экрана, изображение которого наилучшим образом поддаётся дальнейшей обработке.

Полётные эксперименты. Несколько различных типов полётных экспериментов проведено как часть проекта AIM (Advanced In-flight Measurement Techniques). Одной из задач было измерение структурных вибраций на малых самолётах с помощью МКФИ. На тестовый самолёт P180 установлена стереоскопическая система камер в целях проверки возможности измерения деформации поверхности с использованием МКФИ для вибрационных испытаний с разрешением изображений по времени. Сравнение временных рядов деформации, полученных с применением акселерометров, а также с помощью МКФИ, показывает, что оба метода измерения дают результаты того же порядка и с теми же характеристиками частоты. Остальные различия должны быть исследованы в дальнейших экспериментах.

Основной вывод по проведённым экспериментам заключается в том, что МКФИ является мощным и простым в использовании инструментом для измерения на земле, например, низкочастотных колебаний крыла с высокой точностью. Ограничения определяются объёмом записываемых изображений, максимальной частотой кадров камеры, а также пространственным разрешением системы камер и, не в последнюю очередь, оптическим доступом.

После успешного применения МКФИ для измерения вибрации крыла тестового малого самолёта P180 на земле установка камер была сертифицирована для лётных испытаний, целью которых является выполнение экспериментальных измерений деформации крыла в полёте. Несколько успешных лётных испытаний было выполнено на заводе "Piaggio Aero Industries" в Генуе (Италия).

Более подробно лётные испытания описаны в [9–13].

Заключение. В данной работе представлены теоретические и экспериментальные исследования влияния пространственных параметров на статистические характеристики метода корреляции фоновых изображений. Создана математическая модель формирования изображения при наклоне плоскости матрицы относительно плоскости фонового экрана, выявлена зависимость пространственного разрешения изображений, получаемых при таких условиях, от различных параметров. Выполнены серии экспериментов по определению влияния угла между оптической осью камеры и плоскостью фонового экрана на точность измеряемых смещений фонового экрана. Построены зависимости погрешности измерений от величины смещения при разных углах. Такой подход позволил получить экспериментальные данные о влиянии угла наклона камеры на статистические характеристики метода.

Полученные зависимости наглядно показывают, что при больших углах между плоскостью изображения и исследуемой поверхностью формируемые изображения обладают значительной нелинейностью даже без учёта аббераций. При увеличении угла между плоскостью изображения и исследуемой поверхностью происходит значительное уменьшение разрешающей способности. Метод корреляции фоновых изображений не может повысить пространственное разрешение изображений, полученных в ходе эксперимента.

Для уменьшения нелинейности и роста пространственного разрешения изображений можно рекомендовать в экспериментах применение шаймпфлюг-адаптера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kirmse T., Wagner A.** Advanced methods for in-flight flap gap and wing deformation measurements in the project AWIATOR // Proc. of the First CEAS Europ. Air and Space Conf. Berlin, Germany, 2007. 6 p. [CD-ROM].
2. **Поройков А. Ю., Скорнякова Н. М.** Анализ метода корреляции фоновых изображений для измерения изгиба металлической поверхности // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 43–46.
3. **Фомин Н. А., Мелеева О. В.** Корреляционный анализ цифровых изображений течений с субпиксельной точностью // Автометрия. 2012. 48, № 3. С. 82–89.
4. **Панин С. В., Титков В. В., Любутин П. С.** Исследование эффективности алгоритмов фильтрации векторных полей при оценке деформации материалов методом корреляции цифровых изображений // Автометрия. 2013. 49, № 2. С. 57–67.
5. **Petit C., Jentink H. W., Boden F. et al.** Introducing a new measurement method for wing twist and bending // Proc. of the ETTC 2009. Toulouse, France, 24–26 June, 2009. 6 p.
6. **Boden F., Kirmse T., Weikert T. et al.** Application of a new optical measurement technique for non-intrusive wing deformation measurements on a large transport aircraft // 21st SFTE (EC) Symposium. Vergiate, Italy, 3–6 October, 2010. Paper 4. 23 p.
7. **Shapiro L., Stockman G.** Computer Vision. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2001. 617 p.
8. **PIVTEC GmbH.** Particles, Imaging & Velocimetry. URL: <http://www.pivtec.com/> (дата обращения: 15.11.2013).
9. **Назаров Н. Г.** Метрология. Основные понятия и математические модели. М.: Высш. шк., 2002. 348 с.
10. **Boden F., Wolf T., Lanari C., Torres A.** IPCT ground vibration measurements on a small aircraft // Advanced In-Flight Measurement Techniques /Eds. F. Boden, N. Lawson, H. W. Jentink, J. Kompenhans. Springer, 2013. P. 33–55.

11. **Boden F., Lanari C., Torres A., Weikert T.** In-flight IPCT for wing deformation measurements on small aircraft // Advanced In-Flight Measurement Techniques /Eds. F. Boden, N. Lawson, H. W. Jentink, J. Kompenhans. Springer, 2013. P. 57–72.
12. **Boden F., Jentink H., Petit C.** IPCT wing deformation on a large transport aircraft // Advanced In-Flight Measurement Techniques /Eds. F. Boden, N. Lawson, H. W. Jentink, J. Kompenhans. Springer, 2013. P. 93–115.
13. **Raffel M., Willert Ch. E., Kompenhans J.** Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Springer, 2000. 253 p.

Поступила в редакцию 15 ноября 2013 г.
