
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

*МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (05.13.11)*

УДК 681.786

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-101-108

Оптико-электронный комплекс измерения деформации поверхности в режиме реального времени

А.Ю. Поройков, К.М. Лапицкий

Проблема измерения деформаций характерна для многих отраслей науки и техники. Чаще всего она встречается в автомобильной промышленности, строительстве и авиации. В последнем случае (из-за ряда особенностей отрасли) измерение деформации носит жизненно важный характер. В настоящее время в авиастроении актуальна задача проведения исследований в полетном эксперименте.

Разработке подобных методов посвящены международные научно-технические проекты AIM и AIM2. В результате их реализации предложена новая разновидность видеодиагностического метода измерения деформаций — метод корреляции фоновых изображений. Он основан на кросскорреляционной обработке изображений и успешно применен в полетных испытаниях на различных типах летательных аппаратов, начиная Evktor VUT100 Cobra и заканчивая Airbus 380.

Рассмотрен разработанный оптико-электронный комплекс для измерения 3D-деформаций поверхностей в режиме реального времени. Он построен на базе метода корреляции фоновых изображений и позволяет проводить измерения в натурном эксперименте и в режиме реального времени. Приведено детальное описание метода и составляющих частей комплекса. Представлен алгоритм обработки изображений с помощью программного обеспечения DeformVision. Для проверки работоспособности комплекса проведены экспериментальные исследования с помощью имитатора деформирующейся поверхности. Результаты исследований показали, что разработанный комплекс обладает точностью 0,5 мм на площади 900 см² при амплитуде смещений 10 мм. При этом программное обеспечение позволяет проводить измерения в режиме реального времени со скоростью не менее 5 измерений в секунду.

Ключевые слова: измерения деформации, цифровая обработка изображений, измерения в режиме реального времени.

Для цитирования: Поройков А.Ю., Лапицкий К.М. Оптико-электронный комплекс измерения деформации поверхности в режиме реального времени // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 101—108. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-101-108.

An Optoelectronic System for Real-Time Surface Deformation Measurements

A.Yu. Poroykov, K.M. Lapitskiy

The problem of measuring deformations is relevant for many branches of science and technology. Most often it is encountered in the automotive, construction and aircraft industries. In the latter case, deformation measurements are of vital importance due to a number of features specific to the industry. At present, the task of carrying out investigations in a flight experiment is of relevance in the aircraft industry.

The international research projects called Advanced In-Flight Measurement Techniques (AIM and AIM2) are devoted to development of such methods. A new version of the videogrammetric method, called the Image Pattern Correlation Technique, has been proposed as a result of implementing these projects. The above mentioned technique, which is based on cross-correlation processing of images, has successfully been applied in performing flight tests for different aircraft types ranging from Evkektor VUT100 Cobra to Airbus 380.

The developed optoelectronic system for real-time measurements of 3D surface deformations is considered. The system is developed on the basis of the Image Pattern Correlation Technique and makes it possible to carry out measurements in a full-scale experiment and in real time. A detailed description of the method and the system constituent parts is given. An image processing algorithm implemented using the DeformVision software is presented. For checking the system operability, experimental studies using a deforming surface simulator were carried out. The study results have shown that the developed system has an accuracy of 0.5 mm on a surface area of 900 cm² at a displacement amplitude of 10 mm. The system software allows real-time measurements to be carried out at a rate of no less than 5 measurements per second.

Key words: deformation measurements, digital image processing, real-time measurements.

For citation: Poroykov A. Yu., Lapitskiy K.M. An Optoelectronic System for Real-Time Surface Deformation Measurements. Bulletin of MPEI. 2019;2:101—108. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-101-108.

Введение

Проблема измерения деформаций встречается во многих отраслях науки и техники. Чаще всего она характерна для автомобильной промышленности, строительства и авиации. В последнем случае, из-за ряда особенностей отрасли, измерение деформации носит жизненно важный характер. Измерения проводят множеством различных методов, начиная с простейших механических датчиков, заканчивая сложными голографическими установками, использующими высокоточные оптические системы и когерентные источники света.

Все методы можно разделить на две большие группы: использующие тензoeлектрические, пьезoeлектрические и механические датчики и опто-геометрические методы.

Методы первой группы применяют тензодатчики, основанные на таких эффектах, как тензорезистивный, прямой пьезoeлектрический и некоторых других. Основной принцип работы таких датчиков заключается в изменении параметров чувствительного элемента, таких как электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и тому подобных при механической деформации. Основным недостатком данных методов заключается в невозможности получить поле деформации на всей поверхности исследуемого объекта, так как измерения проходят локально.

Основные методы второй группы — метод делительных сеток, поляризационно-оптический метод, метод голографической и спекл-интерферометрии. Все они бесконтактны и позволяют получить поле деформации на всей поверхности исследуемого объекта. Их основными недостатками считаются высокая погрешность (метод делительных сеток), необходимость выполнения точных копий исследуемых объектов из специальных материалов (поляризационно-оптический метод), сложность и высокая стоимость необходимых специализированных оптических приборов (интерферометрические методы).

В авиастроении в настоящее время поставлена задача проведения исследований в летном эксперименте [1 — 4], т.е. проведения измерений непосредственно в полете на борту летательного аппарата. Разработке

таких методов посвящены международные научно-технические проекты AIM и AIM2 [5]. В результате их реализации предложена новая разновидность видеogramметрического метода измерения деформаций IPCT (Image Pattern Correlation Technique), в русскоязычных публикациях — метод корреляции фоновых изображений (МКФИ) [6 — 8]. Он основан на кросскорреляционной обработке изображений и успешно применен в полетных испытаниях на различных типах летательных аппаратов, в том числе на самолете Airbus A380 [1]. Алгоритмы, используемые в методе, базируются на алгоритмах метода анемометрии по изображению частиц (АИЧ или Particle Image Velocimetry в англоязычной литературе).

Применение МКФИ основано на получении экспериментальных изображений в ходе испытания и последующей их обработке в специализированном программном обеспечении. В ряде случаев появляется необходимость проведения экспериментов с получением результатов в режиме реального времени.

Примером таких исследований служат непосредственно летные испытания, стоимость проведения которых, особенно для больших летательных аппаратов, высока, как и цена ошибки в ходе их проведения. Получение результатов измерений позволит корректировать программу испытаний непосредственно в ходе полета, что предоставляет возможность проводить их более эффективно, как с научно-технической точки зрения, так и с экономической.

Другим примером являются испытания с труднодоступными объектами, такими как вращающиеся лопасти воздушного винта. В ходе работ по проекту AIM2 создан специализированный комплекс по измерению деформаций вращающейся лопасти и успешно использован в летных испытаниях [9]. Однако сам комплекс нужен только для записи изображений с видеокамер, но не для последующей обработки. В качестве отечественных публикаций в данном направлении стоит отметить работу по измерению деформации вращающихся лопастей воздушного винта в аэродинамической трубе [10]. Авторы выявили ряд проблем в проведении такого рода экспериментов, которые могли бы быть устранены при использовании комплекса измере-

ния деформаций на основе МКФИ в режиме реального времени.

Существуют работы, в которых реализована обработка изображений метода АИЧ в режиме реального времени [11, 12], в [13] описаны измерения деформации поверхности на основе гравиметрического метода, схожего с МКФИ. Однако в указанных работах взяты аппаратные средства, чьими главными недостатками являются высокая стоимость и малая универсальность. Использование персонального компьютера для данной задачи позволяет избавиться от этих недостатков.

Метод корреляции фоновых изображений

Метод корреляции фоновых изображений — высокоточный оптический метод диагностики деформации. Он основан на компьютерной обработке изображений поверхности со специально нанесенной структурой с помощью кросскорреляционных алгоритмов. Простота экспериментальной установки, бесконтактность и цифровая обработка — его основные преимущества перед другими методами.

Схема обработки картин метода корреляции фоновых изображений представлена на рис. 1. Алгоритм метода включает следующие этапы последовательных действий.

1. *Нанесение фонового экрана на исследуемую поверхность.* Фоновый экран представляет собой специальный рисунок, изображение которого регистрируется цифровыми видеокамерами. Нанесение может проходить путем наклеивания распечатанного экрана

на поверхность или нанесения на нее краски согласно заданным параметрам.

2. *Регистрация изображения фонового экрана в исходном состоянии исследуемой поверхности.* Полученное изображение будет опорным при расчете корреляционной функции.

3. *Регистрация изображения фонового экрана при деформации поверхности.* Полученное изображение содержит информацию о деформации и является измерительным при расчете кросскорреляционной функции.

4. *Кросскорреляционная обработка полученных изображений.* Опорное и измерительное изображения, соответствующие определенному моменту деформации поверхности, разбиваются на соответствующие прямоугольные участки, так называемые окна опроса. Размер участков и шаг разбиения задаются параметрами обработки. Для полученных участков рассчитывается корреляционная функция.

5. *Поиск максимума корреляционной функции.* Его координаты определяют смещение изображения на выбранном участке. Рассчитанные смещения всех участков одного измерительного изображения при дальнейшей обработке, согласно выработанной математической модели, позволяют измерить деформацию всей поверхности.

Восстановление 3D-профиля поверхности

Исследования с применением МКФИ проводят с использованием как одной единственной цифровой

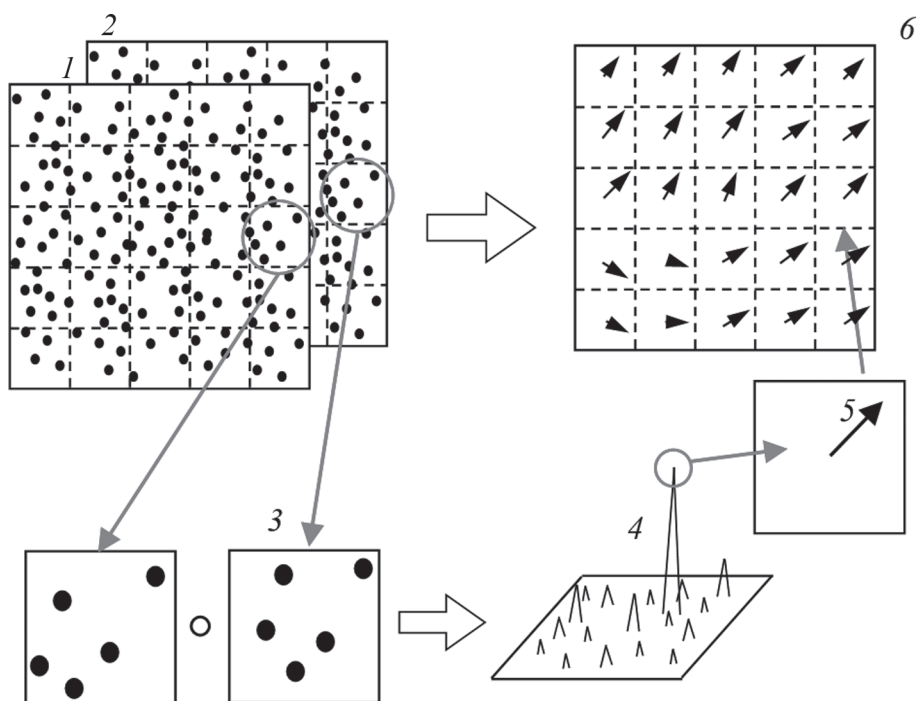


Рис. 1. Схема обработки картин метода корреляции фоновых изображений:

1, 2 — опорное и измерительное изображения; 3 — расчет корреляции для окон опроса; 4 — полученная функция корреляции; 5 — найденный вектор смещения; 6 — итоговое векторное поле

камеры, так и нескольких. В отдельных случаях, когда хорошо известны геометрические параметры экспериментальной установки, а также характер смещений ограничен конструктивными особенностями исследуемого объекта, возможна визуализация и получение информации о смещениях в 3D при использовании одной камеры [2]. Однако в большинстве случаев такой подход позволяет получить информацию только о двухмерных смещениях (сдвиге и наклоне поверхности объекта). Поэтому в общем случае в экспериментах для анализа 3D-смещений следует использовать стереосистемы, состоящие из двух или более цифровых камер.

Применение более одной камеры в эксперименте делает обязательным проведение процедуры калибровки, которая позволяет в дальнейшем сопоставить изображения, полученные различными камерами. Схема формирования стереопар представлена на рис. 2.

Изображение некоторого трехмерного объекта получают с помощью двух видеокамер. Точка P рассматриваемого объекта проецируется в точки C и D на светочувствительных матрицах двух видеокамер. В системе существуют четыре системы координат: мировая W , предметная M , матриц первой C и второй D видеокамер. Первые две системы трехмерные и имеют компоненты X, Y и Z . Две последние имеют только компоненты X и Y и представляют собой цифровые изображения.

Таким образом, для процедуры калибровки необходимо узнать, каким образом выполняется проецирование точек рассматриваемого предмета на матрицы видеокамер, т. е. определить, каким образом происходит преобразование трехмерных мировых координат в двухмерные координаты на изображениях. Для этого нужно определить параметры расположения самой камеры в координатах мирового пространства, называемые

внешними параметрами, и параметры самой камеры (внутренние параметры). С математической точки зрения процедура калибровки сводится к определению калибровочной матрицы, содержащей как внутренние, так и внешние параметры в неявном виде.

Для проведения калибровки камеры выбрана модель камеры Холла (Hall), включающая в себя 11 параметров [14]:

$$\begin{bmatrix} s^I P_r \\ s^I P_c \\ s \end{bmatrix} = \mathbf{W} \mathbf{C} \begin{bmatrix} W P_x \\ W P_y \\ W P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W P_x \\ W P_y \\ W P_z \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $^I P_r, ^I P_c$ — координаты точки на изображении; $\mathbf{W} \mathbf{C}$ — матрица камеры, преобразующая координаты мирового пространства в координаты на изображении; $^W P_x, ^W P_y, ^W P_z$ — координаты точки в мировых координатах; $c_{11} — c_{33}$ — элементы матрицы камеры.

Матрица $\mathbf{W} \mathbf{C}$ содержит в себе в неявном виде другие матрицы, которые включают в себя физические параметры камеры и оптической системы:

$$^I \mathbf{P} = \mathbf{W} \mathbf{C} \mathbf{W} \mathbf{P} = \left(\mathbf{I}_F \mathbf{S}_F \mathbf{C}_F \Pi(f) \right) \mathbf{C}_W \mathbf{TR}(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) \mathbf{W} \mathbf{P},$$

где $^I \mathbf{P}$ — координаты точки на изображении; $\mathbf{I}_F \mathbf{S}$ — матрица преобразования вещественных координат в пиксельные; $\mathbf{C}_F \Pi(f)$ — матрица перспективного преобразования; $\mathbf{C}_W \mathbf{TR}(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ — матрица, учитывающая поворот и перенос; $\mathbf{W} \mathbf{P}$ — координаты точки в мировых координатах.

Таким образом, процедура калибровки сводится к нахождению 11 неизвестных параметров матрицы камеры. Для этого следует определить на изображении минимум 6 точек, у которых будут точно известны координаты в мировом пространстве. После этого можно

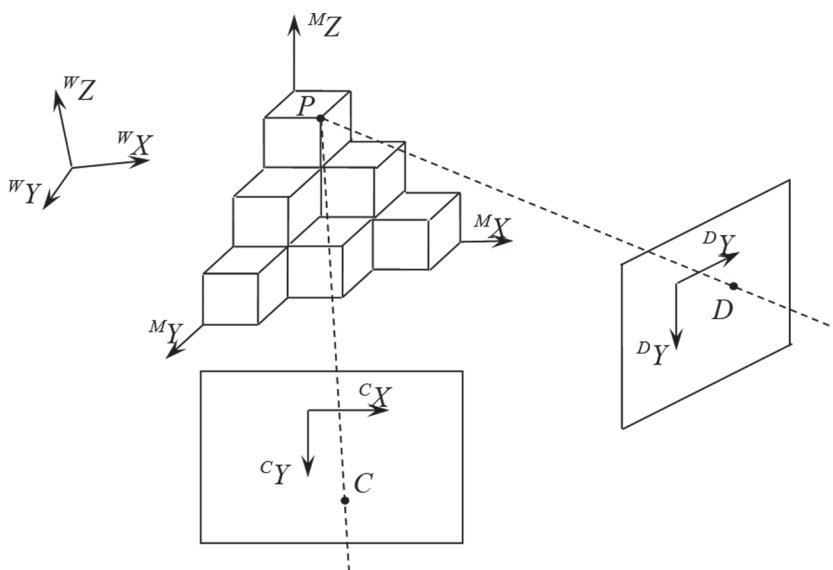


Рис. 2. Схема формирования стереопар

получить систему, состоящую из 12 уравнений, решение которой позволит найти 11 искомым параметров.

Для восстановления 3D-профиля поверхности в экспериментах с использованием нескольких цифровых камер использовалась кросскорреляционная обработка для определения смещения окон опроса на изображениях. Расчет функций корреляции для окон опроса на опорном и измерительном изображениях позволяет определить векторное поле двумерных векторов смещения, а стереосистема видеокамер — получить два таких поля для изображений, выведенных различными камерами. Учет взаимного расположения камер и исследуемого объекта, которое в математической форме выражается калибровочными матрицами камер, помогает рассчитать общее поле трехмерных векторов смещений, которое и представляет собой искомую деформацию поверхности. Зная начальное положение, можно восстановить трехмерный профиль поверхности.

При проведении обработки в экспериментах с одной камерой разбиение на окна опроса происходит без учета реальных координат. В экспериментах с несколькими камерами необходимо определить координаты окон опроса в мировой или предметной системах координат, причем для каждого окна опроса следует проверить его существование на обоих изображениях, так как поля зрения камер не перекрываются полностью.

Оптико-электронный комплекс измерения 3D-деформаций поверхностей в режиме реального времени

Для диагностики деформаций в режиме реального времени создан оптико-электронный комплекс, со-

стоящий из двух основных частей. Первая часть — стереосистема видеокамер piA2400 фирмы Basler, установленных на штативе Monfrotto с возможностью изменения величины стереобазы. Основные технические характеристики видеокамер: камеры монохромные; интерфейс передачи данных GigE; ПЗС-матрица Sony ICX625; скорость съемки — 17 кадров в секунду при разрешении 5 Мп. Вторая часть — программное обеспечение DeformVision, реализованное на языке C#, для восстановления 3D-профиля деформированной поверхности в режиме реального времени.

Изображения получают с помощью API Basler с помощью технологии передачи Gigabit Ethernet. Далее они проходят предварительную обработку [15] и передаются для расчета двумерного Фурье-преобразования для массива окон опроса с помощью библиотеки FFTW [16], являющейся, де-факто, стандартом для корреляционной обработки изображений для методов МКФИ и АИЧ. Пример результатов расчета с помощью DeformVision представлен на рис. 3.

Алгоритм обработки включает этапы последовательных действий.

1. Получение опорных изображений для первой и второй камер (ОИ1 и ОИ2) с помощью Basler API и передачу их в DeformVision.

2. Расчет координат окон опроса в соответствии с заданными параметрами обработки (областью, в которой происходит измерение на поверхности, шагом разбиения области на окна опроса) в мировой или предметной системах координат для первой и второй камер.

3. Сохранение координат окон опроса (КОО1 и КОО2).

4. Формирование массива окон опроса для ОИ1 и ОИ2 в соответствии с рассчитанными координатами

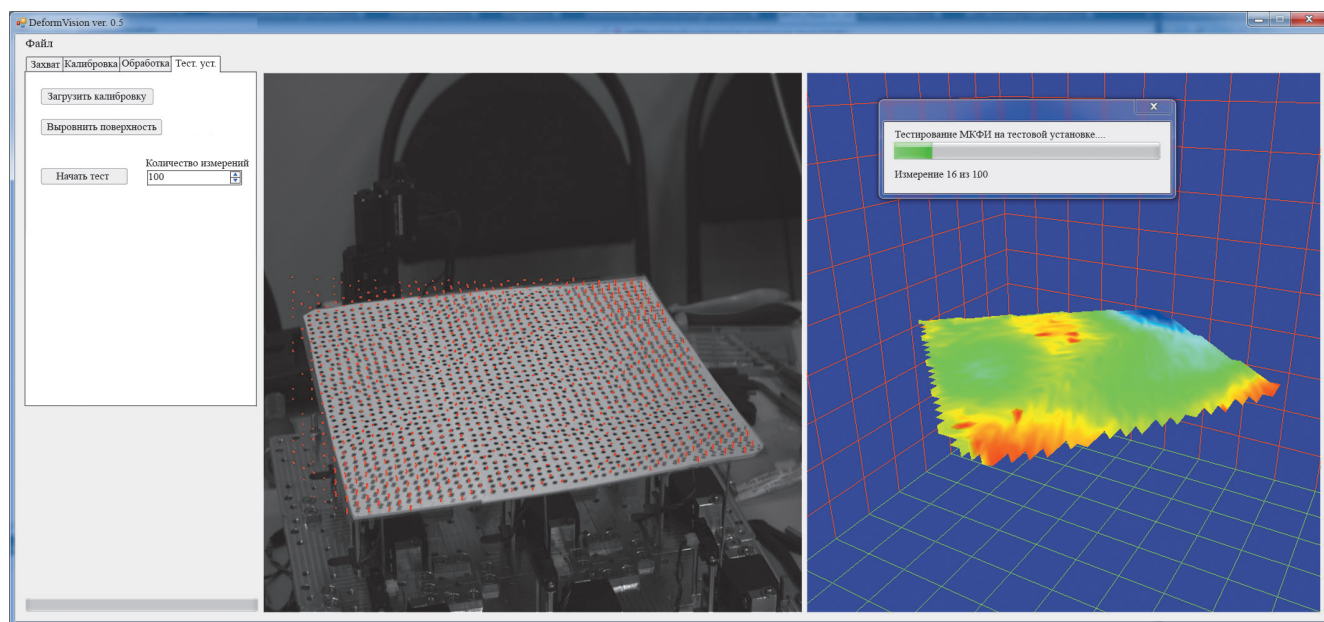


Рис. 3. Программное обеспечение DeformVision с результатами расчета векторного поля с одной из камер и восстановления профиля поверхности во время проведения эксперимента

и передачу массива в библиотеку FFTW для расчета двухмерного Фурье-преобразования.

5. Сохранение результатов расчета для ОИ1 (ФОИ1) и ОИ2 (ФОИ2).

6. Получение измерительных изображений для первой и второй камер (ИИ1 и ИИ2) с помощью Basler API и передачу их в DeformVision.

7. Формирование массива окон опроса для ИИ1 и ИИ2 в соответствии с рассчитанными и сохраненными координатами КОО1 и КОО2 и передачу массива окон опроса в библиотеку FFTW для расчета двухмерного Фурье-преобразования.

8. Расчет произведения результатов Фурье-преобразования массивов окон опроса для измерительных изображений и сохраненных массивов ФОИ1 и ФОИ2 и передачу его в библиотеку FFTW для расчета обратного двухмерного Фурье-преобразования (функции кросскорреляции).

9. Поиск максимума функции корреляции для массива значений с субпиксельной точностью и создание двухмерных полей двухмерных векторов для первой и второй камер.

10. Расчет двухмерного поля трехмерных векторов как итогового результата измерения деформации поверхности.

11. Отображение результатов расчета в виде трехмерной поверхности.

12. Если обработка не остановлена, то переход к п. 6.

Экспериментальная проверка работоспособности комплекса

Для экспериментальной проверки работоспособности комплекса использовано специально сконструированное устройство — имитатор деформирующейся поверхности (рис. 4) [17]. Он предназначен для формирования поверхностей с различной деформацией.

Деформация поверхности задается с помощью серводвигателей, перемещающих различные точки поверхности вниз или вверх на заданное расстояние. На поверхности имитатора закреплен фоновый экран,

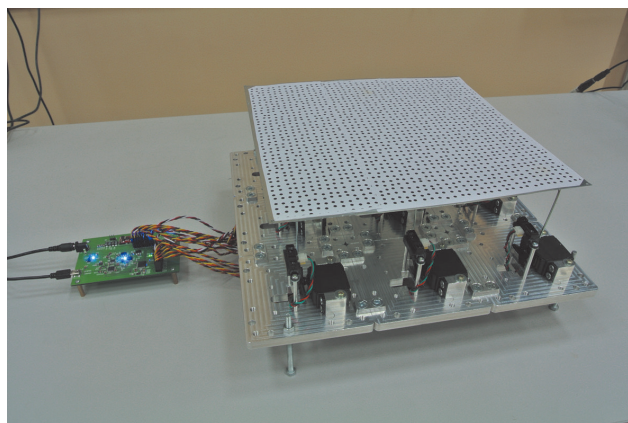


Рис. 4. Имитатор деформирующейся поверхности

представляющий собой набор черных точек на белом фоне, расположенных случайным образом.

Экспериментальная установка для проверки работоспособности разработанного оптико-электронного комплекса измерения деформаций изображена на рис. 5.

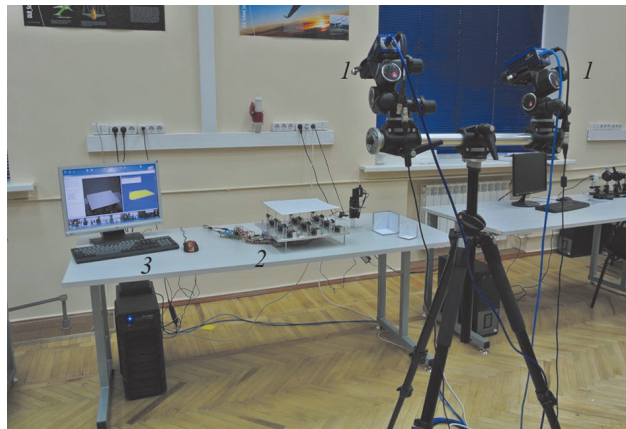


Рис. 5. Экспериментальная установка для проверки работоспособности разработанного оптико-электронного комплекса измерения деформаций:

1 — видеокамеры стереосистемы; 2 — имитатор деформирующейся поверхности; 3 — персональный компьютер с установленным программным обеспечением DeformVision

Проверку работоспособности проводили следующим образом. Изображение тестовой поверхности с двух цифровых видеокамер поступало на персональный компьютер, где их обрабатывали с помощью DeformVision. Положения поверхности в контрольных точках сравнивали с результатами расчета. Найденную таким образом погрешность для каждой контрольной точки записывали в журнал измерений. После записи цикл повторяли. Деформация поверхности случайным образом и многократное повторение измерений позволили оценить работоспособность комплекса и его инструментальную погрешность. Одновременно с этим измеряли скорость обработки изображений с помощью программного обеспечения.

Результаты эксперимента показали, что разработанный оптико-электронный комплекс измерения деформаций обладает погрешностью 0,5 мм на площади поверхности 900 см² при амплитуде смещений 10 мм. При этом программное обеспечение позволяет выполнять измерения в режиме реального времени со скоростью не менее 5 измерений в секунду.

Заключение

Реализованный комплекс измерения деформаций в режиме реального времени решил проблемы, упомянутые во введении. Так, размещение комплекса в летательном аппарате при небольшой доработке системы крепления помогает корректировать программу испытаний непосредственно в ходе полета, а значит и провести их более эффективно.

При разработке программного обеспечения не проводилось глубокой оптимизации алгоритмов обработки, поэтому скорость измерения комплекса может быть увеличена за счет последующей оптимизации алгоритмов и применения обработки изображений на графических

процессорах. Инструментальная погрешность комплекса также может быть уменьшена за счет применения более сложных алгоритмов обработки, например, с использованием итерационного алгоритма расчета кросскорреляционной функции с деформированием окна опроса.

Литература

1. **Boden F., Jentink H., Petit C.** IPCT Wing Deformation Measurements on a Large Transport Aircraft // *Advanced In-Flight Measurement Techniques*. Springer, 2013. Pp. 93—115.
2. **Veerman H.P.J., Kannemans H., Jentink H.W.** Highly Accurate Aircraft In-flight Wing Deformation Measurements Based on Image Correlation // *Advanced In-flight Measurement Techniques*. Springer, 2013. Pp. 15—32.
3. **Kirmse T. e. a.** Fan Blade Deformation Measurements on the DLR Airbus A320-ATRA by Means of IPCT as Part of the Ground Test Campaign in the Frame of the DLR-project SAMURAI // *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X*. Springer, 2016. Pp. 629—638.
4. **Kirmse T.** Recalibration of a Stereoscopic Camera System for In-flight Wing Deformation Measurements // *Measurement Sci. and Techn.* 2016. V. 27. No. 5. P. 054001.
5. **AIM** — Advanced In-flight Measurement Techniques [Электрон. ресурс] <http://aim.dlr.de> (дата обращения 14.03.2018).
6. **Poroikov A.Yu., Skornyakova N.M.** An Analysis of the Image Pattern Correlation Technique for Measuring the Bending of A Metal Surface // *Measurement Techniques*. 2011. V. 53. No. 10. Pp. 1147—1151.
7. **Boden F. e. a.** A Accuracy of Measurement of Dynamic Surface Deformations by the Image Pattern Correlation Technique // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Proc.* 2014. V. 50. No. 5. Pp. 474—481.
8. **Poroikov A.Yu.** Reconstruction of 3D Profile of a Deformed Metallic Plate by Means of the Image Pattern Correlation Technique // *Measurement techniques*. 2014. V. 57. No. 4. Pp. 390—395.
9. **Boden F. e. a.** In-flight Measurements of Propeller Blade Deformation on a VUT100 Cobra Aeroplane Using a Co-rotating Camera System // *Measurement Sci. and Techn.* 2016. V. 27. No. 7. P. 074013.
10. **Иншаков С.И. и др.** Видеограмметрический метод бесконтактных измерений мгновенной деформации лопастей вращающихся воздушных винтов // *Ученые записки ЦАГИ*. 2013. Т. 44. № 4. С. 547—558.
11. **Satake S. e. a.** Special-purpose Computer for Particle Image Velocimetry // *Computer Phys. Comm.* 2011. V. 182. No. 5. Pp. 1178—1182.
12. **Bennis A., Leeser M., Tadmor G.** Implementing a Highly Parameterized Digital PIV System on Reconfigurable Hardware // *Proc. XX IEEE Intern. Conf. Application-specific Systems, Architectures and Processors*. 2009. Pp. 32—37.
13. **Lei Z., Zhang F., Li X.** FPGA Implementation of 3D-displacement Measurement Based on 2D-DIC and

References

1. **Boden F., Jentink H., Petit C.** IPCT Wing Deformation Measurements on a Large Transport Aircraft. *Advanced In-Flight Measurement Techniques*. Springer, 2013:93—115.
2. **Veerman H.P.J., Kannemans H., Jentink H.W.** Highly Accurate Aircraft In-flight Wing Deformation Measurements Based on Image Correlation. *Advanced In-flight Measurement Techniques*. Springer, 2013:15—32.
3. **Kirmse T. e. a.** Fan Blade Deformation Measurements on the DLR Airbus A320-ATRA by Means of IPCT as Part of the Ground Test Campaign in the Frame of the DLR-project SAMURAI. *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X*. Springer, 2016:629—638.
4. **Kirmse T.** Recalibration of a Stereoscopic Camera System for In-flight Wing Deformation Measurements. *Measurement Sci. and Techn.* 2016;27;5:054001.
5. **AIM**—Advanced In-flight Measurement Techniques [Elektron. Resurs] <http://aim.dlr.de> (Data Obrashcheniya 14.03.2018).
6. **Poroikov A.Yu., Skornyakova N.M.** An Analysis of the Image Pattern Correlation Technique for Measuring the Bending of A Metal Surface. *Measurement Techniques*. 2011;53;10:1147—1151.
7. **Boden F. e. a.** A Accuracy of Measurement of Dynamic Surface Deformations by the Image Pattern Correlation Technique. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Proc.* 2014;50;5:474—481.
8. **Poroikov A.Yu.** Reconstruction of 3D Profile of a Deformed Metallic Plate by Means of the Image Pattern Correlation Technique. *Measurement techniques*. 2014;57;4:390—395.
9. **Boden F. e. a.** In-flight Measurements of Propeller Blade Deformation on a VUT100 Cobra Aeroplane Using a Co-rotating Camera System. *Measurement Sci. and Techn.* 2016;27;7:074013.
10. **Inshakov S.I. i dr.** Videogrammetricheskij Metod Beskontaknykh Izmereniy Mgnovnoy Deformatsii Lopastey Vrashchayushchikhsya Vozdushnykh Vintov. *Uchenye Zapiski TSAGI*. 2013;44;4:547—558. (in Russian).
11. **Satake S. e. a.** Special-purpose Computer for Particle Image Velocimetry. *Computer Phys. Comm.* 2011; 182;5:1178—1182.
12. **Bennis A., Leeser M., Tadmor G.** Implementing a Highly Parameterized Digital PIV System on Reconfigurable Hardware. *Proc. XX IEEE Intern. Conf. Application-specific Systems, Architectures and Processors*. 2009: 32—37.
13. **Lei Z., Zhang F., Li X.** FPGA Implementation of 3D-displacement Measurement Based on 2D-DIC and

FPP // Intern. Symp. Photonics and Optoelectronics. 2014. P. 923304.

14. **Salvi J., Armangué X., Batlle J.** A Comparative Review of Camera Calibrating Methods with Accuracy Evaluation // Pattern Recognition. 2002. V. 35. No. 7. Pp. 1617—1635.

15. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012.

16. **Frigo M., Johnson S.G.** The Design and Implementation of FFTW3 // Proc. IEEE Special Issue on Program Generation, Optimization, and Platform Adaptation. 2005. V. 93. No. 2. Pp. 216—231.

17. **Поройков А.Ю.** Комплекс определения погрешности измерения формы гибкой деформируемой поверхности методом корреляции фоновых изображений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2017. № 6. С. 28—39.

FPP. Intern. Symp. Photonics and Optoelectronics. 2014: 923304.

14. **Salvi J., Armangué X., Batlle J.** A Comparative Review of Camera Calibrating Methods with Accuracy Evaluation. Pattern Recognition. 2002;35;7:1617—1635.

15. **Gonsales R., Vuds R.** Tsifrovaya Obrabotka Izobrazheniy. M.: Tekhnosfera, 2012. (in Russian).

16. **Frigo M., Johnson S.G.** The Design and Implementation of FFTW3. Proc. IEEE Special Issue on Program Generation, Optimization, and Platform Adaptation. 2005;93;2:216—231.

17. **Poroykov A.Yu.** Kompleks Opredeleniya Pogreshnosti Izmereniya Formy Gibkoy Deformiruemoй Povexhnosti Metodom Korrelyatsii Fonovykh Izobrazheniy. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Priborostroenie». 2017;6:28—39. (in Russian).

Сведения об авторах:

Поройков Антон Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ», e-mail: poroykovay@gmail.com

Лапицкий Константин Михайлович — кандидат технических наук, доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ», e-mail: lapitskykm@mail.ru

Information about authors:

Poroykov Anton Yu. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Physics Dept. named V.A. Fabrikant, NRU MPEI, e-mail: poroykovay@gmail.com

Lapitskiy Konstantin M. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Physics Dept. named V.A. Fabrikant, NRU MPEI, e-mail: lapitskykm@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 15.03.2018

The article received to the editor: 15.03.2018