

УДК 53.082.5

А.Ю. Поройков

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: poroykovay@gmail.com*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ГИБКОЙ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ФОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе приведен разработанный и реализованный автором комплекс определения погрешности измерения методом корреляции фоновых изображений. Комплекс позволяет определять погрешность измерения деформаций амплитудой 20 мм на поверхности площадью  $380 \times 380 \text{ мм}^2$  с дискретностью 0,5 мм по горизонтали и вертикали и 0,001 мм по высоте, и погрешностью не более 0,075 мм. Представлен алгоритм работы комплекса и результаты его измерений.

**МЕТОД КОРРЕЛЯЦИИ ФОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОГРЕШНОСТЬ МЕТОДА,  
ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Проблема измерений деформаций встречается во многих отраслях науки и техники. Особенно часто она встречается в автомобильной промышленности, строительстве и авиации. В последнем случае, из-за ряда особенностей отрасли, измерение деформации носит жизненно важный характер.

Измерения деформаций могут выполняться различными методами. Все их можно условно разделить на две группы: методы, использующие тензoeлектрические, пьезoeлектрические и механические датчики и оптико-телевизионные методы.

В авиастроении в настоящее время появилась задача проведения исследований в натурном эксперименте [1, 2]. Для таких измерений большинство методов, как первой, так и второй группы мало пригодны из-за следующих недостатков: локальность измерений, влияние факторов внешней среды на результаты измерений и необходимость использования сложных оптических систем.

Можно отметить работы отечественных авторов по разработке и применению видеogramметрических методов диагностики деформаций [3, 4]. Однако в данных работах измерения проводятся либо в другом масштабе, либо используется подход, основанный на отдельном измерении положения каждого маркера (отметки) на изображении. Для оценки погрешности применяется либо компьютерное моделирование, либо оценка инструментальной погрешности.

Метод корреляции фоновых изображений (МКФИ) – современный оптико-телевизионный метод измерения деформаций, основанный на цифровой обработке изображений (в англоязычной литературе Image Pattern Correlation Technique – IPCT) [5]. Его

главные особенности – простота экспериментальной установки (требуется две цифровых камеры и компьютер), бесконтактность и использование современных алгоритмов обработки изображений. Поэтому данный метод наилучшим образом подходит для применения в натуральных экспериментах.

Алгоритм метода (рис. 1.) включает следующие этапы последовательных действий.

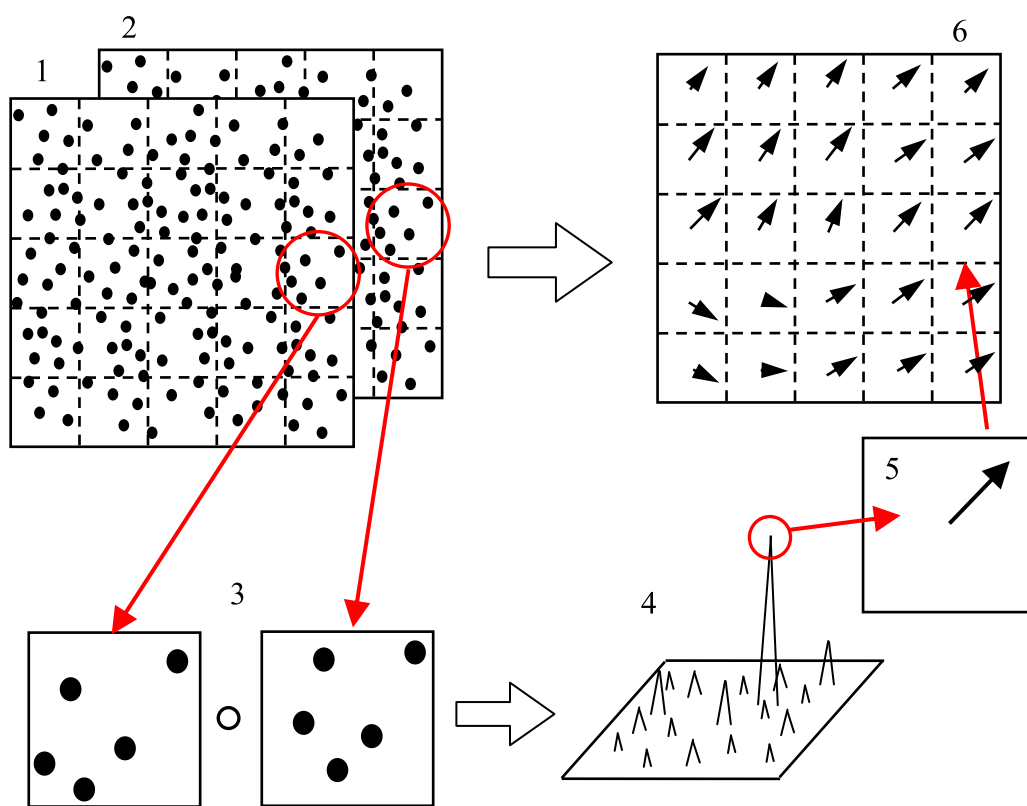
1. Нанесение фонового экрана на исследуемую поверхность. Фоновый экран представляет собой специальный рисунок, изображение которого регистрируется цифровыми видеокамерами. Нанесение может происходить путем наклеивания распечатанного экрана на поверхность или нанесения на нее краски согласно заданным 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 изгибе поверхности. Полученное изображение содержит информацию об изгибе и является измерительным при расчете кросскорреляционной функции.

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

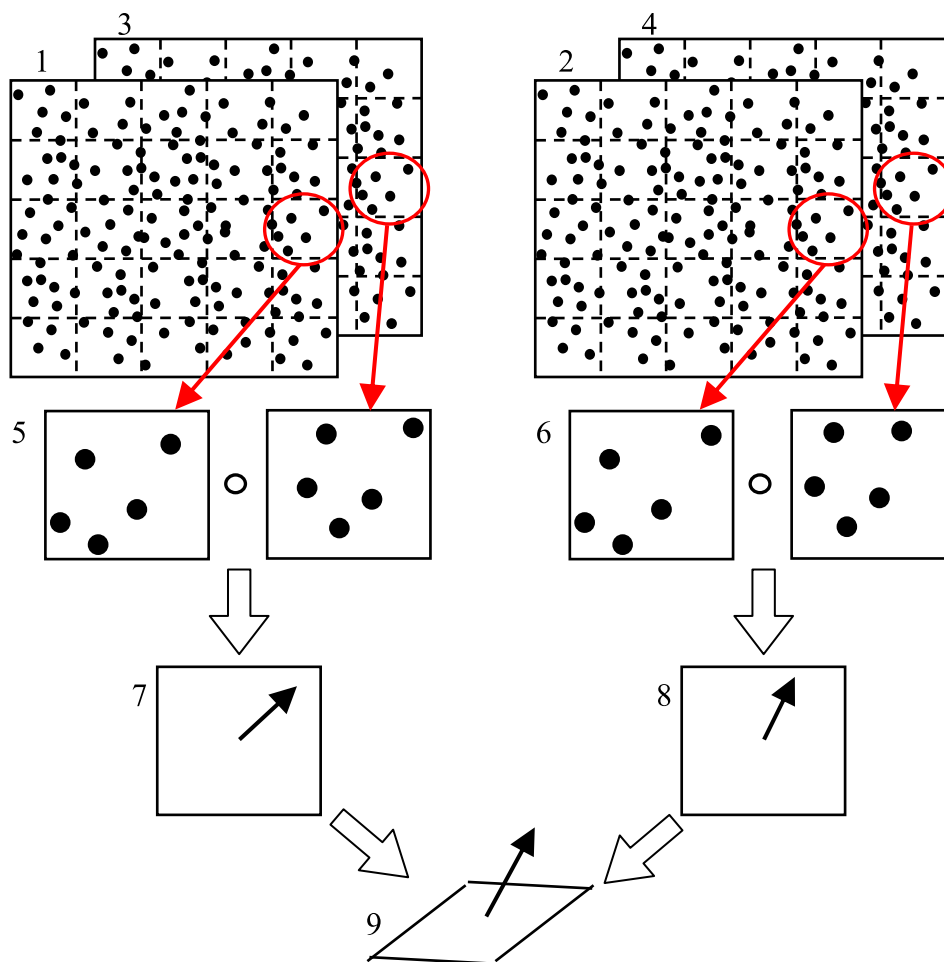
5. Поиск максимума корреляционной функции. Его координаты определяют смещение изображения на выбранном участке. Рассчитанные смещения всех участков одного измерительного изображения при дальнейшей обработке согласно выработанной математической модели позволяют измерить изгиб всей поверхности.



1 – опорное изображение, 2 – измерительное изображение, 3 – расчет корреляции для окон опроса, 4 – полученная функция корреляции, 5 – найденный вектор смещения, 6 – итоговое векторное поле

Рис.1 Схема обработки картин метода корреляции фоновых изображений

При восстановлении 3D профиля поверхности возникает необходимость использования двух и более видеокамер. Обработка полученных экспериментальных данных в таком случае требует совмещения двух изображений одного и того же объекта. Для этого производится предварительная процедура калибровки, которая позволяет в дальнейшем сопоставить изображения, полученные различными камерами (рис. 2) [7].



1, 2 – опорные изображения с первой и второй камеры, 3, 4 – измерительные изображения с первой и второй камеры, 5, 6 – расчет корреляции для окон опроса, 7, 8 – найденные вектора смещения, 9 – итоговый 3D вектор смещения

Рис. 2 Схема обработки 3D картин МКФИ

Хотя сам метод прост в реализации, но анализ погрешности его измерений затруднен ввиду применения кросскорреляционной функции. Поэтому оценить погрешность с помощью прямых расчетов сложно. В основном для ее оценки применяют или оптогеометрические построения [8-10], или цифровое моделирование изображений с их последующей обработкой и сравнением полученных результатов с заложенными при моделировании параметрами [11, 12]. Однако указанные подходы не могут учесть все факторы, возникающие в натуральных экспериментах. Поэтому предлагается определять погрешность измерений прямым сравнением результатов измерений МКФИ с результатами измерений, полученными другим методом. Этот подход позволит учесть все факторы, влияющие на погрешность, и оценить ее максимально точно.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для автоматизации измерений было предложено создание программно-аппаратного комплекса автоматического определения погрешности МКФИ. Основная идея состоит в

использовании поверхности, деформация которой происходит заданным образом (имитатора деформируемой поверхности), и высокоточного оптического датчика, с помощью которого можно измерить эту поверхность. Сравнивая результаты, полученные с помощью датчика и с помощью МКФИ, становится возможным определить абсолютную погрешность измерений метода в пределах погрешности датчика.

Для измерения всей поверхности одним датчиком предлагается использовать модули линейного перемещения с шаговыми двигателями. Перемещение оптического датчика над поверхностью в двух перпендикулярных направлениях позволит измерить расстояние до поверхности во всех ее точках с заданным шагом.

Рассматриваемый комплекс состоит из четырех составных частей: имитатора деформируемой поверхности, блока измерения расстояния до поверхности, электронного устройства управления и программного обеспечения для персонального компьютера.

Имитатор деформируемой поверхности позволяет менять профиль поверхности гибкой пластины площадью  $380 \times 380 \text{ мм}^2$ . Амплитуда смещений составляет 20 мм. Внешний вид имитатора деформируемой поверхности представлен на рисунке 3.

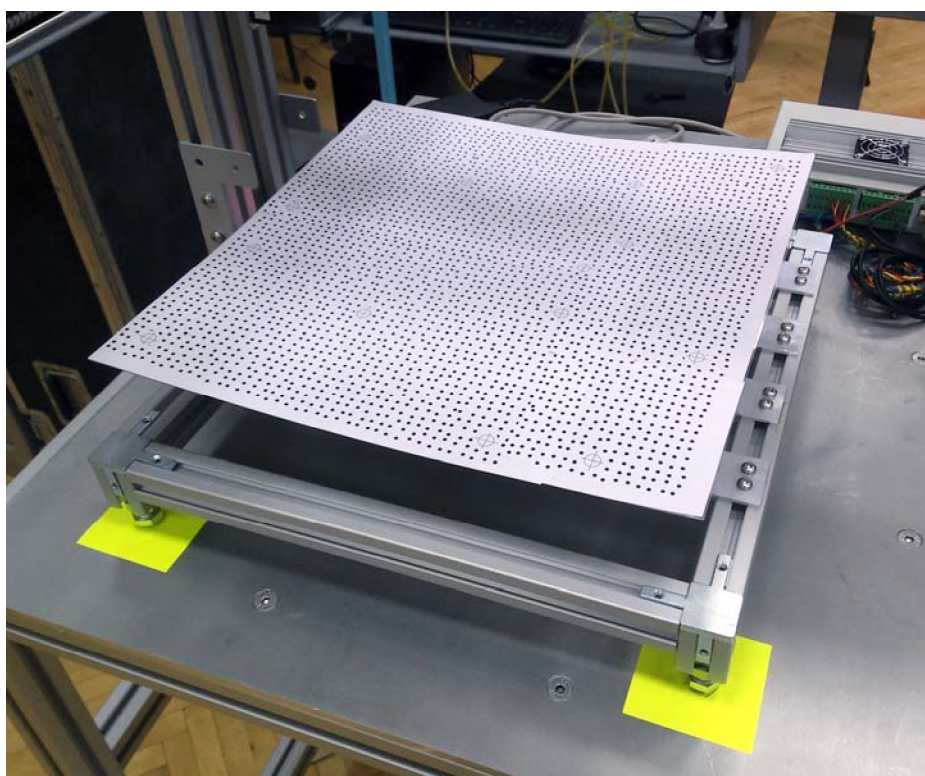


Рис. 3. Внешний вид имитатора деформируемой поверхности

Блок измерения расстояния до поверхности состоит из двух перпендикулярных друг другу модулей линейного перемещения PLLM-12. На них, в свою очередь, расположен оптический датчик расстояния LS5-40/50 фирмы НПП ПРИЗМА. Датчик на основе триангуляции отраженного от измеряемой поверхности лазерного луча измеряет расстояние до деформируемой поверхности с дискретностью 0,001 мм и с погрешностью не хуже  $\pm 0,075 \text{ мм}$  в диапазоне расстояний 50 мм и ближней границей до датчика 40 мм. Размер пятна лазерного луча датчика в середине диапазона измерений составляет 175 мкм и не превышает значения 300 мкм во всем диапазоне.

Электронное устройство управления является связующим звеном между имитатором деформируемой поверхности, блоком измерения расстояния до поверхности и персональным компьютером. Оно позволяет задавать деформацию поверхности, изменяя положения сервоприводов, перемещать оптический датчик над поверхностью и измерять расстояние до нее в заданных точках.

Программная часть предназначена для управления всей установкой в целом: задания положений сервоприводов (деформации объекта) и отображения результатов блока измерения расстояния до поверхности с помощью графического интерфейса. Программная часть тестовой установки разрабатывалась на языке C# для персонального компьютера. Программа позволяет задавать положение деформируемой поверхности и отображать измеренные датчиком расстояния значения расстояния до поверхности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема эксперимента для проведения измерений с помощью разработанного комплекса представлена на рисунке 5. Алгоритм работы комплекса заключается в:

- Программное обеспечение случайным образом задает положение деформируемой поверхности на имитаторе.
- Изображение поверхности с двух цифровых видеокамер поступает на персональный компьютер, где они обрабатываются с помощью разработанного программного обеспечения, и восстанавливается профиль поверхности.
- Оптический датчик перемещается над поверхностью и производит измерения расстояния до нее в нескольких заданных точках.
- Расстояния до поверхности в этих точках сравниваются с положением точек на восстановленном профиле поверхности. Таким образом определяется искомая погрешность.

После записи экспериментальных данных цикл повторяется. Деформация поверхности случайным образом и многократное повторение измерений позволяют получить статистические данные о погрешности метода.

В эксперименте были использованы видеокамеры VLG-24M фирмы Baumer. Камера построена на основе КМОП матрицы Sony IMX249 размером 1/1,2'' с разрешением 1920×1200 пикселей размером 5,86×5,86 мкм. Для захвата изображений с цифровых камер был использован API, предоставляемый производителем камер (Baumer). Обработка полученных изображений проводилась с помощью алгоритмов быстрого Фурье-преобразования.

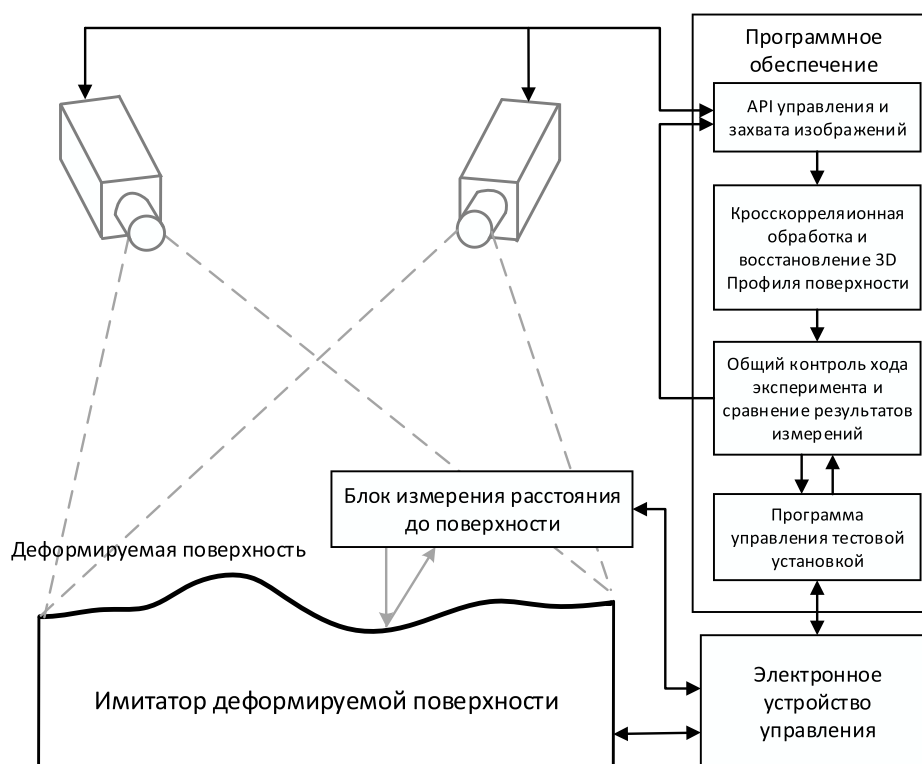


Рис 5. Схема эксперимента для проведения измерений погрешности МКФИ

Перед проведением эксперимента выполнялась процедура калибровки камер. Она заключалась в нахождении наилучшей аффинной калибровочной матрицы, содержащей 11 параметров для одной камеры. Матрица рассчитывается путем сопоставления не менее 12 точек с известными мировыми координатами с 12 точками на изображении, получаемом с камеры.

Внешний вид комплекса автоматического определения погрешности МКФИ представлен на рисунке 6.



Рис 6. Внешний вид комплекса автоматического определения погрешности МКФИ:  
а – стереосистема видеокамер; б – имитатор деформируемой поверхности; в – линейные модули перемещения;  
г – оптический датчик расстояния; д – персональный компьютер

Расстояние от камер до центра поверхности в эксперименте составило 1350 мм. Наклон камер к исследуемой поверхности –  $20^\circ$ . Были использованы объективы Fujinon HF25HA-1B с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1:1,4.

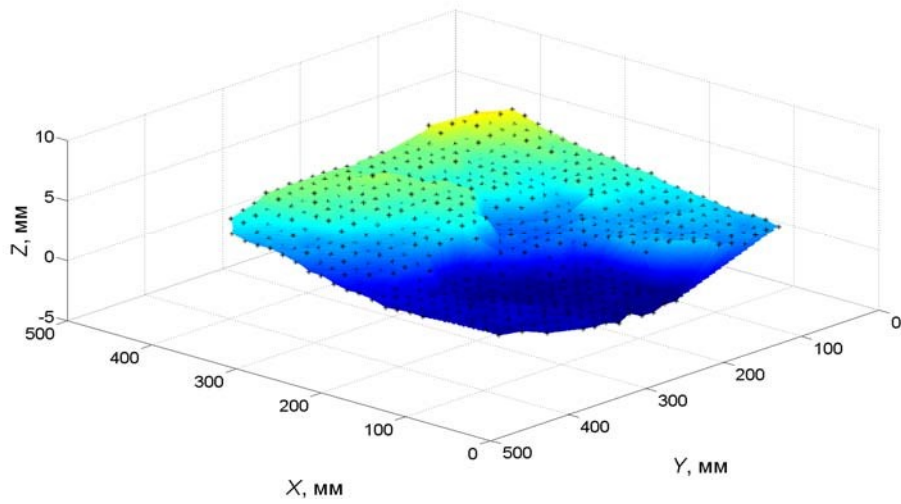
Пример результатов измерений с помощью рассматриваемого комплекса представлен на рисунке 7. Профиль деформированной поверхности, восстановленный с помощью МКФИ, приведен на рисунке 7а. Он получен путем расчета 568 векторов смещения с окном опроса размером  $128 \times 128$  пикселей. Профиль деформированной поверхности, восстановленный с помощью разработанного комплекса, показан на рисунке 7б. Он получен путем измерения в 121 точке с шагом 38 мм.

Результатом, позволяющим судить о погрешности метода, является разность двух профилей, определенных МКФИ и блоком измерения расстояния, представленная на рисунке 7в. Максимальная разность составила 1,693 мм, среднее значение разности 0,617 мм и ее стандартное отклонение составило 0,358 мм.

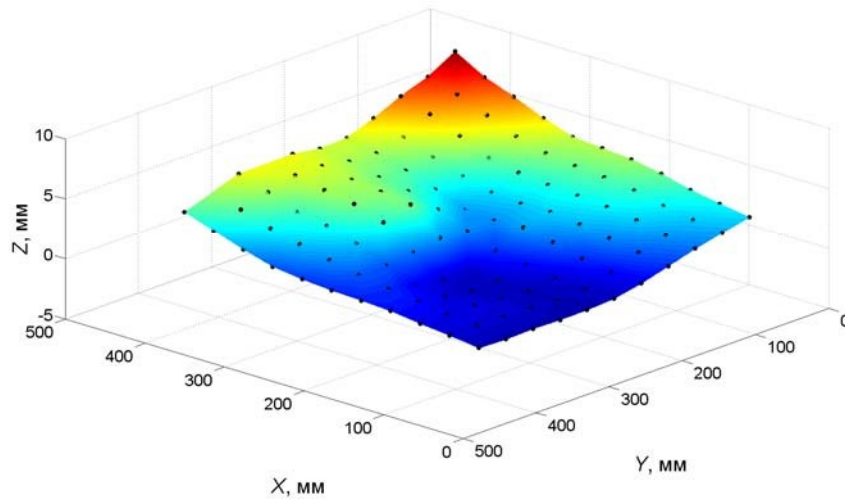
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом работы служит разработанный аппаратно-программный комплекс определения погрешности метода корреляции фоновых изображений. Он позволяет определять погрешность измерения деформаций амплитудой 20 мм на поверхности площадью

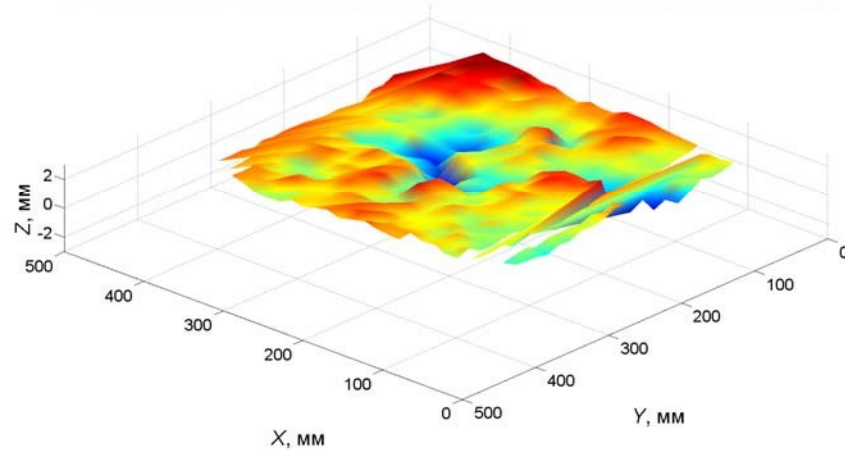
$380 \times 380 \text{ мм}^2$  с дискретностью 0,5 мм по горизонтали и вертикали и 0,001 мм по высоте, и погрешностью не более 0,075 мм.



*a*



*б*



*в*

Рис 7. Результаты измерения деформируемой поверхности:  
а – профиль деформированной поверхности, восстановленный с помощью МКФИ;  
б – профиль деформированной поверхности, восстановленный с помощью разработанного комплекса; в –  
разность двух профилей

Таким образом, комплекс позволяет проводить автоматическое измерение погрешности метода корреляции фоновых изображений, что позволит в дальнейшем получить экспериментальные зависимости влияния различных параметров на погрешность метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Boden F., Stasicki B.** Development of a Rotating Camera for In-flight Measurements of Aircraft Propeller Deformation by Means of IPCT // *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics IX*. – Springer International Publishing, 2014. – Pp. 555-562.
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 Berlin Heidelberg, 2013. – Pp. 15-32.
3. **Кулеш В. П.** Измерения деформации адаптивной носовой части крыла в аэродинамической трубе методом видеограмметрии // *Ученые записки ЦАГИ*. – 2014. – Т. 45. – №. 6. – С. 100-109.
4. **Любутин П. С., Панин С. В.** Исследование точности и помехоустойчивости построения векторов перемещений при оценке деформаций оптико-телевизионным методом // *Вычислительные технологии*. – 2006. – Т. 11. – №. 2.
5. **Kirmse T.** Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Airbags mittels Image Pattern Correlation Technique (IPCT) // *Oldenburger 3D*. 2009. Pp. 235-242.
6. **Westerweel J.** Digital particle image velocimetry: theory and application. – TU Delft, Delft University of Technology, 1993. – 235 p.
7. **Поройков А.Ю.** Восстановление 3D профиля деформированной металлической пластины методом корреляции фоновых изображений // *Измерительная техника*. – 2014. – №4. – С. 15-19.
8. **Lawson N.J., Wu J.** Three-dimensional particle image velocimetry: error analysis of stereoscopic techniques // *Measurement Science and Technology*. – 1997. – Vol. 8. – №. 8. – Pp. 894-900.
9. **Lawson N.J., Wu J.** Three-dimensional particle image velocimetry: experimental error analysis of a digital angular stereoscopic system // *Measurement Science and Technology*. – 1997. – Vol. 8. – №. 12. – Pp. 1455-1464.
10. **Boden F., Kirmse T., Поройков А.Ю., Ринкевичюс Б.С., Скорнякова Н.М., Шашкова И.А.** Исследования точности измерений динамических деформаций методом корреляции фоновых изображений // *Автометрия*. – 2014. – Т. 50. – №5. С. 56 – 65.
11. **Scarano F., Riethmuller M.L.** Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset // *Experiments in Fluids*. – 1999. – Vol. 26. – №. 6. – Pp. 513-523.
12. **Willert C.** The fully digital evaluation of photographic PIV recordings // *Applied Scientific Research*. – 1996. – Vol. 56. – №. 2-3. – Pp. 79-102.

A.Yu. Poroykov

*National Research University "MPEI", Russia, Moscow,  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: poroykovay@gmail.com*

## ERROR DETERMINATION OF FLEXIBLE DEFORMABLE SURFACE FORM MEASUREMENT BY IMAGE PATTERN CORRELATION TECHNIQUE

*The paper presents a complex for determining the measurement error of image pattern correlation technique developed and realized by the author. The complex makes it possible to determine the measurement error of deformations with an amplitude of 20 mm on a surface area of 380×380 mm<sup>2</sup> with a resolution of 0.5 mm horizontally and vertically and 0.001 mm in height and*



*an error of not more than 0.075 mm. The algorithm of the complex operation and the results of its measurements are presented.*

IMAGE PATTERN CORRELATION TECHNIQUE, ACCURACY OF THE METHOD,  
MEASUREMENT OF DEFORMATION