

УДК: 539.43; 535.8

Видеограмметрическая система для бесконтактных измерений полей деформаций крупногабаритных объектов

Курулюк К.А.

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е.

Жуковского, ул. Жуковского, 1, Московская область, Жуковский, 140180, Россия

e-mail: ksusha_kp_13@mail.ru

Аннотация

Создан действующий макетный образец мобильной видеограмметрической измерительной (ВГМ) системы, предназначенный для оперативных бесконтактных измерений и визуализации распределенных деформаций крупногабаритных объектов в машиностроении.

Разработана и сформулирована пошаговая методика измерений с использованием одной цифровой камеры. Разработана двухэтапная методика калибровки измерительной системы.

Проведены контрольные испытания макетного образца мобильной ВГМ системы при измерениях деформаций натурного крыла нового образца транспортного самолета в эксплуатационных условиях стенда в ходе промышленных наземных ресурсных испытаний. Максимальная дистанция измерений составила 26 м. Максимальное отклонение в концевом сечении Δu составило 2590 мм, при этом среднеквадратическая погрешность измерений нормальных отклонений точек не превышала 2,5 мм.

Ключевые слова: метод видеogramметрии, бесконтактные измерения, ресурсные испытания, нормальные деформации, поля деформации.

1. Введение

Крупногабаритные объекты машиностроения при эксплуатации подвергаются всевозможным нагрузкам, в результате чего испытывают значительные деформации. Нормальное функционирование, прочность и безопасность таких объектов достигается многосторонними исследованиями и испытаниями, важную роль в которых играют методы и средства измерений геометрических параметров движения и деформации [1-5]. В частности, в последние годы возникали задачи, связанные с необходимостью измерений деформаций крупногабаритных моделей и элементов конструкции летательных аппаратов. Одним из перспективных методов измерений для решения такого типа задач является оптический метод видеogramметрии (ВГМ), сочетающий в себе современные средства оптики, цифровой регистрации изображений, численной обработки изображений и математического анализа [6-10]. Высокая информативность метода ВГМ обусловлена тем, что из одного изображения можно извлечь информацию о сотнях и тысячах точек объекта одновременно. Примерами могут стать проекты SARISTU, SADE, выполненные в рамках Седьмой Европейской международной рамочной программы и других международных и отечественных контрактов [11, 12], в которых с помощью метода видеogramметрии были получены качественные и

количественные картины полей распределенных нормальных деформаций поверхности для объектов размерами до 10 м. Для решения этих задач были разработаны штатные измерительные оптические системы, привязанные к экспериментальным установкам и аэродинамическим трубам. При этом возникла необходимость создания мобильной измерительной системы, не привязанной к конкретной экспериментальной установке, которую можно было бы оперативно применять в разных условиях, в том числе в полевых и цеховых, а также проводить измерения деформации элементов на натуральных летательных аппаратах при их испытаниях на земле и в полете.

Целью настоящей работы являлось совершенствование метода видеограмметрии и создание мобильной измерительной видеограмметрической системы (системы ВГМ) для обеспечения бесконтактных измерений и визуализации распределенных деформаций крупногабаритных объектов в машиностроении, а также расширение области применения метода. При этом новая видеограмметрическая система должна обладать следующими особенностями: малыми собственными габаритами и весом, адаптируемостью к задаче исследований, объекту измерений и внешним условиям испытаний; возможностью одновременных измерений деформаций в большом числе точек; точностью измерений, удовлетворяющей требованиям испытаний.

Данная работа выполнялась в 2017 году в рамках проекта «Разработка мобильной видеограмметрической измерительной системы для оперативных бесконтактных измерений и визуализации распределенных деформаций» по гранту

Правительства Московской области в сферах науки, технологий, техники и инноваций.

2. Принцип видеограмметрии

Суть метода видеограмметрии состоит в определении трех координат x, y, z точки объекта в пространстве по двум координатам u, v отклика этой точки на цифровом изображении. Формально имеются только два уравнения для трех неизвестных. В мировой практике для разрешения неопределенности задачи восстановления координат обычно применяют метод стереограмметрии [13-17], при котором получают два изображения поверхности исследуемого объекта с помощью двух камер, находящихся на расстоянии, соизмеримом с расстоянием до объекта. Комбинируя данные, полученные из двух таких изображений, замыкают рабочую систему уравнений [18]. Однако в реальных экспериментальных установках и стендах не всегда имеется возможность размещения двух камер в нужных точках.

В методе видеограмметрии для измерений достаточно только одной цифровой камеры, что является большим преимуществом метода в сложных условиях при ограниченном окружающем пространстве.

В общем случае рабочая характеристика, т.е. система уравнений преобразования координат точек изображения в координаты точек объекта, может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} x = x_0 + (z - z_0) \frac{M_{11} \cdot (u - u_0) + M_{12} \cdot (v - v_0) + M_{13} \cdot w_0}{M_{31} \cdot (u - u_0) + M_{32} \cdot (v - v_0) + M_{33} \cdot w_0} \\ y = y_0 + (z - z_0) \frac{M_{21} \cdot (u - u_0) + M_{22} \cdot (v - v_0) + M_{23} \cdot w_0}{M_{31} \cdot (u - u_0) + M_{32} \cdot (v - v_0) + M_{33} \cdot w_0} \end{cases} \quad (1)$$

где: u_0, v_0 координаты центра изображения, т.е. точки пересечения оптической оси приемного объектива с плоскостью чувствительной матрицы цифровой камеры;

w_0 – задний отрезок приемного объектива;

x_0, y_0, z_0 – координаты центра приемного объектива (центра проекции) в системе координат объекта;

M_{ij} – элементы матрицы вращения, являющиеся функциями углов ориентации α, β и γ системы координат камеры в системе координат объекта [19].

Группу параметров $P = \{x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma\}$ принято называть фотограмметрическими параметрами внешнего ориентирования, а $\{u_0, v_0, w_0\}$ – параметрами внутреннего ориентирования. К параметрам внутреннего ориентирования относят также параметры, учитывающие геометрические искажения изображения, вносимые несовершенствами приемного объектива. В данной работе было установлено, что для объективов стандартного качества и требуемой погрешности измерений коррекцию искажений изображения можно выполнить, учитывая только радиальную дисторсию второго порядка, по формулам:

$$u - u_0 = (u' - u_0) \left(1 - d \frac{r^2}{w_0^2} \right) \text{ и } v - v_0 = (v' - v_0) \left(1 - d \frac{r^2}{w_0^2} \right), \quad (2)$$

где: u', v' – координаты искаженного изображения, u, v – исправленные координаты изображения, d – безразмерный коэффициент дисторсии, $r^2 = (u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2$. Коэффициент дисторсии принято также причислять к параметрам внутреннего ориентирования, т.е. $Q = \{u_0, v_0, w_0, d\}$.

Для разрешения неопределенности задачи восстановления координат и замыкания системы уравнений (1) используется априорная информация об исследуемом объекте. В данной измерительной системе априорная информация представляется наперед заданным известным законом изменения координаты z точек объекта в процессе деформации

$$\Delta z = f(\Delta x, \Delta y). \quad (3)$$

Еще одной особенностью данного метода видеограмметрии является то, что на исследуемую поверхность наносят не мелкомасштабную структуру с нерегулярно расположенными пятнами, а набор локальных маркеров, расположенных в узлах регулярной сетки. Это сделано для более точной привязки результатов измерений к координатам исследуемой поверхности, а также позволяет избегать сложных операций корреляционного анализа [20].

3. Объект исследований и измерительная система

Демонстрация применения измерительной системы ВГМ проведена в реальных условиях промышленных ресурсных испытаний натурального самолета. Объектом испытаний являлась правая консоль натурального крыла крупногабаритного тяжелого военно-транспортного самолета с размахом 50,5 м, выполненная из алюминиевого сплава. Схема самолета показана на рисунке 1.

В пространстве измерений задавалась правая прямоугольная система координат, в которой начало системы координат было задано на пересечении оси среднего лонжерона консоли крыла с плоскостью симметрии самолета, ось Oz была

направлена вдоль оси лонжерона, ось Oy – вертикально вверх, а ось Ox дополняла правую систему координат (рисунок 2). Регистрирующая цифровая камера с источником света (осветителем) располагалась в плоскости симметрии самолета, приблизительно над тоской начала системы координат на высоте около 1 м над поверхностью крыла. Оптическая ось приемного объектива составляла угол ϑ около 4° к поверхности крыла.

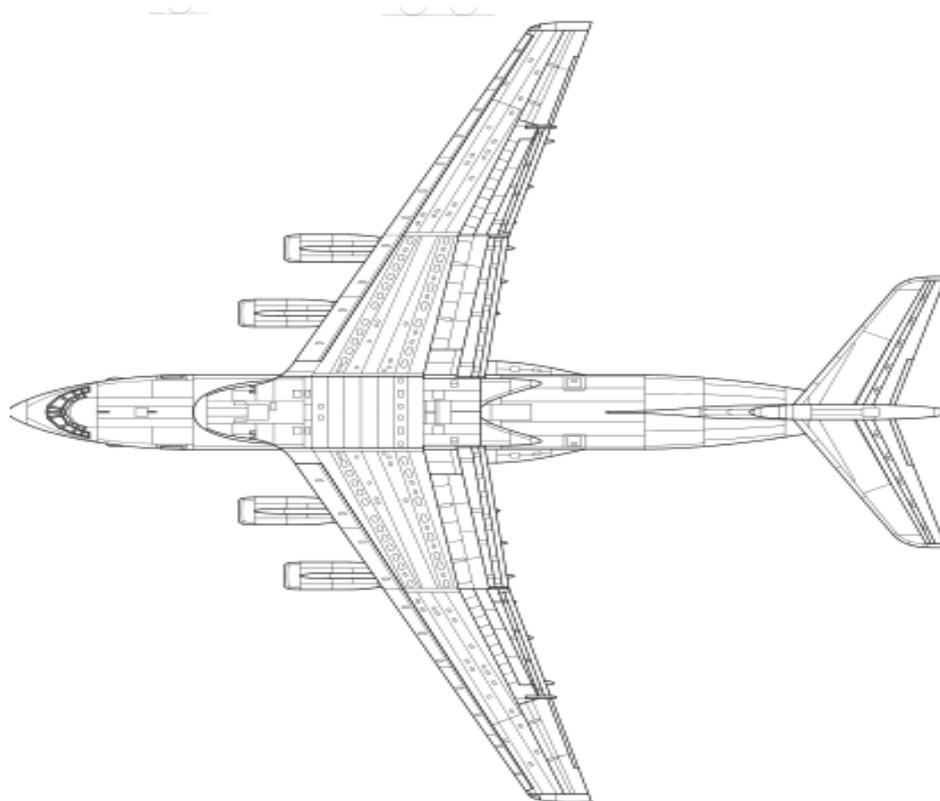


Рисунок 1 Схема самолета в плане

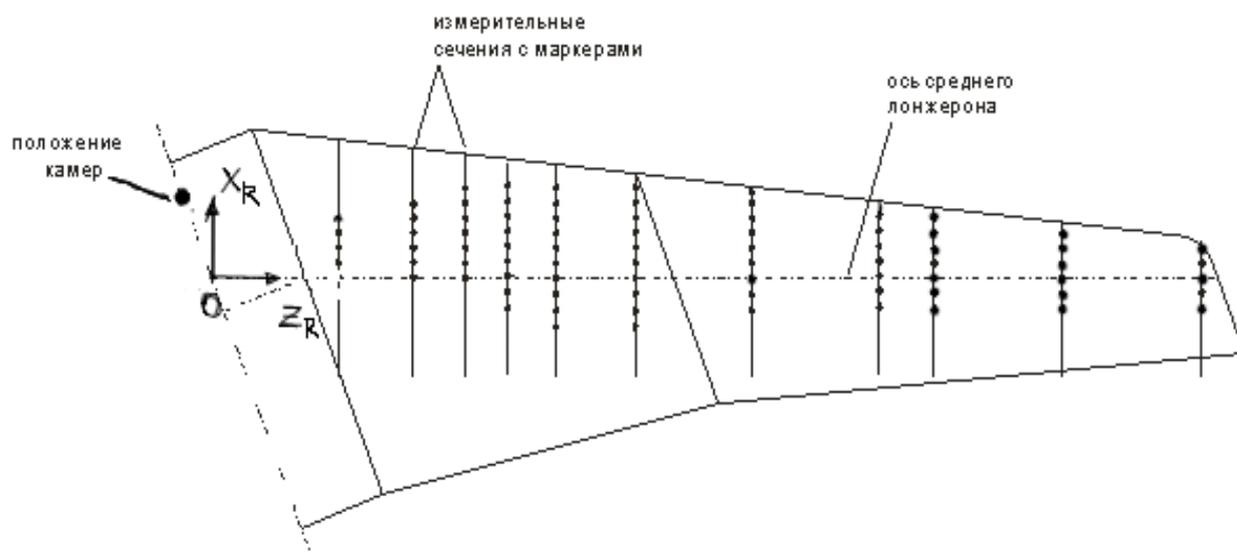


Рисунок 2 Система координат и расположение измерительных маркеров

Измерительные маркеры были размещены на правой консоли крыла в одиннадцати сечениях, перпендикулярных оси среднего лонжерона, что показано на рисунке 2. Количество маркерных точек в одном ряду варьировалось от 4 до 10 в зависимости от ширины консоли крыла в конкретном сечении. Маркеры были выполнены в форме кружочков из световозвращательной пленки диаметром от 3 мм в ближнем сечении до 25 мм в дальнем и наклеены на поверхность крыла посредством вертикальных пластмассовых пилончиков 8. Высота центров всех маркеров от поверхности равнялась 20 мм.

4. Калибровка измерительной системы

Для определения рабочей характеристики (1) измерительной системы необходимо найти с достаточной точностью численные значения 10 параметров внутреннего и внешнего ориентирования. Для этого необходима процедура калибровки измерительной системы.

Калибровка состоит в том, что в пространстве измерений тем или иным способом задают массив базовых точек с известными координатами $\{x^*, y^*, z^*\}$, регистрируют одно или несколько цифровых изображений и измеряют координаты $\{u^*, v^*\}$ центров соответствующих точек на полученных изображениях. Затем, сопоставляя математически с помощью регрессивной процедуры массивы $\{x^*, y^*, z^*\}$ и $\{u^*, v^*\}$ с системой уравнений (1) в качестве функционала (обычно методом наименьших квадратов), находят значения искоемых коэффициентов рабочей характеристики измерительной системы.

Массив базовых точек в пространстве задают с помощью специального контрольного приспособления (КП) – калибровочного тест-объекта, который представляет собой специальную конструкцию или планшет с маркерами, трехмерные координаты которых предварительно измерены с необходимой точностью инструментальными средствами.

Проведенные исследования показали, что для мобильной измерительной системы ВГМ наиболее подходит двухэтапная калибровка, которая выполняется в большинстве случаев, когда монтаж и эксплуатация системы ВГМ на месте измерений требует дополнительной настройки, приводящей к изменению коэффициентов рабочей характеристики.

Первый этап, называемый калибровкой камеры, осуществляется с целью определения только четырех фотограмметрических параметров $Q = \{u_0, v_0, w_0, d\}$ внутреннего ориентирования. Он выполняется с максимальной точностью в лабораторных условиях с использованием аттестованного КП – тест-объекта – и поверенных вспомогательных измерительных средств. Внешний вид тест-объекта

планшетного типа представлен на рисунке 3. После выполнения этого этапа настройки приемного объектива и камеры фиксируются.



Рисунок 3 Внешний вид тест-объекта планшетного типа

Следует отметить, что при использовании мобильной видеограмметрической системы в полевых условиях, как правило, не представляется возможным заранее настроить камеру с приемным объективом. Поэтому «первый» этап настройки рекомендуется выполнять после выполнения измерений, сохранив неизменными настройки камеры и приемного объектива, достигнутые в эксперименте.

Второй этап выполняется на экспериментальной установке при полностью смонтированной и настроенной измерительной системе. Его целью является определение шести фотограмметрических параметров $P = \{x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma\}$ внешнего ориентирования рабочей характеристики. Этот этап часто называют экспресс-калибровкой. Он выполняется с помощью облегченного и упрощенного мобильного контрольного приспособления и переносных вспомогательных измерительных средств. Точность экспресс-калибровки может быть ниже точности

калибровки в лабораторных условиях, но такая калибровка может быть выполнена в сложных стендовых, цеховых или полевых условиях. Предложено экспресс-калибровку выполнять с помощью облегченного мобильного тест-объекта типа тест-рейки (рисунок 4).

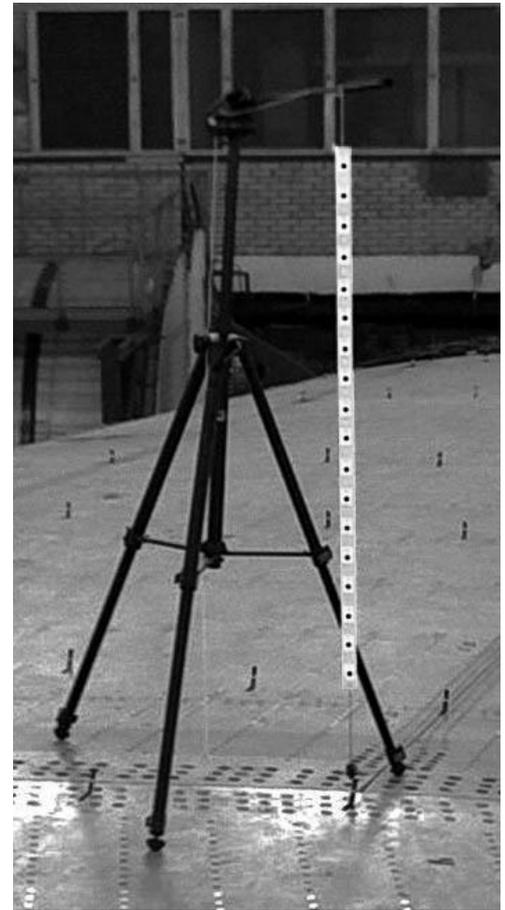
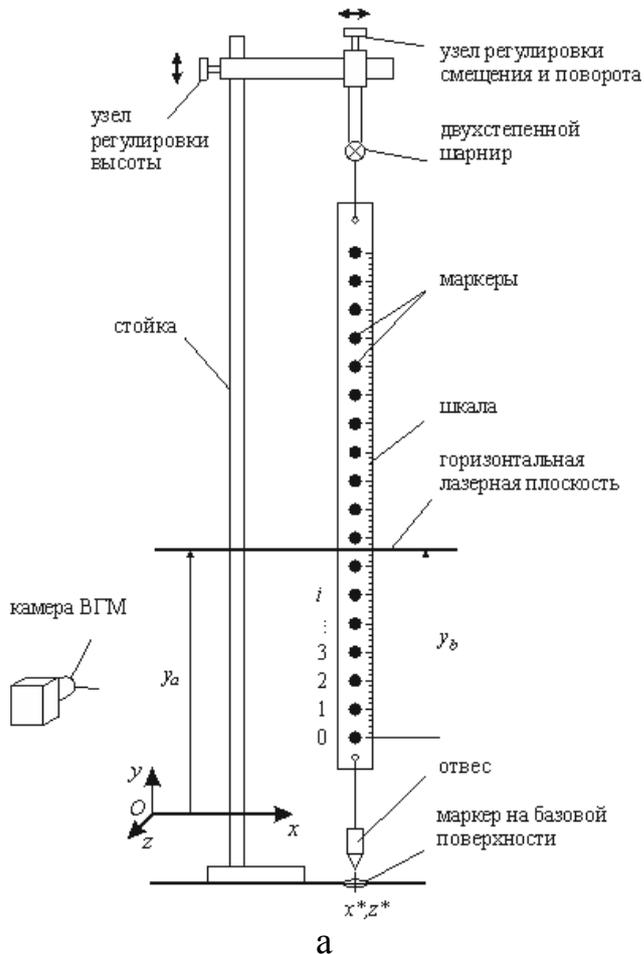


Рисунок 4 Схема (а) и внешний вид (б) облегченного мобильного тест-объекта

Кроме того, разработанная методика измерений предусматривает выполнение так называемой автокалибровки, в которой в качестве тест-объекта используется группа базовых маркеров на выделенном участке поверхности исследуемого объекта, координаты x^*, y^*, z^* которых заранее известны, и в предположении, что эта область не деформируется. Такой прием выполняется в каждом отсчете с целью

устранения погрешности, обусловленной неконтролируемыми перемещениями объекта как целого. Сравнивая измеренные значения x, y, z координат с заранее известными значениями x^*, y^*, z^* , можно оценить текущую погрешность измерений.

5. Порядок измерений

Измерения выполнялись в режиме ступенчатого нагружения консоли крыла в соответствии с программой ресурсных испытаний. Нагрузка задавалась с шагом 10% от максимальной эксплуатационной нагрузки на воздушном режиме в прямом и обратном направлении. В процессе испытаний на каждой полке нагружения регистрировались по три рабочих изображения маркеров с интервалом около 2 с. В ходе испытаний для каждого цикла нагружения была получена серия из 69 рабочих изображений. В начале цикла нагружения производились отсчеты «темновых» кадров (при выключенной осветительной лампе) и кадры начального состояния без нагрузки (опорные изображения).

Априорная информация включала массив заранее известных значений x^*, y^*, z^* координат маркеров на объекте в исходном недеформированном состоянии. Эти значения определялись в процессе разметки сетки и нанесения маркеров. Другая составляющая априорной информации заключалась в известной зависимости измерения координаты z от изменения координат x и y . В данных испытаниях крыла большого удлинения эта зависимость задавалась как при изгибе консольно закрепленной балки, согласно конечно-шарнирной модели.

6. Численная обработка изображений

Обработка серия рабочих изображений выполнялась в пакетном режиме с помощью набора специализированных программ. Общий алгоритм обработки включал в себя следующие операции:

- вычитание из всех рабочих изображений серии «темновых» изображений;
- локализацию образов маркеров на опорных изображениях поверхности модели и измерение их двухмерных координат u, v . Эта операция выполнялась вручную с помощью соответствующего графического редактора. Полученный массив координат служил шаблоном, задающим структуру расположения маркеров;
- измерение координат u, v маркеров на всех однородных изображениях в серии в пакетном режиме с помощью специализированной программы;
- вычисление трехмерных координат x, y, z соответствующих маркеров в пространстве из полученных координат u, v по формулам (1) и (2) с присоединением заданной зависимости (3). Эта операция выполнялась также в пакетном режиме с помощью соответствующей программы. Программа обеспечивает оперативное графическое представление искомым полей деформации поверхности объекта по точкам маркеров;
- определение искомым геометрических параметров деформации изгиба и кручения крыла самолета по сечениям;
- сопроводительную визуализацию полей деформации на всех режимах нагружения в виде трехмерных графиков.

На рисунке 5 приведен график вертикального и углового смещений концевое сечения 11 в последовательности отсчетов при прямом и обратном ходе нагружения. На рисунке 6 приведены графики распределения смещений сечений консоли крыла по трем осям при разных нагрузках. Видно, что смещения по вертикальной оси Oy (деформация изгиба) многократно превосходят смещения по двум другим осям Ox и Oz . На рисунке 7 приведено поле вертикальных отклонений точек консоли крыла при максимальной нагрузке. Максимальное отклонение Δy в концевом сечении составило 2590 мм.

Анализ стандартных отклонений точек по двум координатам в каждом сечении может служить индикатором суммарной погрешности измерений. Из графика на рисунке 8 видно, что погрешность измерений по координате y во всех сечениях, кроме последнего, не превосходит 1,7 мм и лишь в последнем достигает до 2,5 мм.

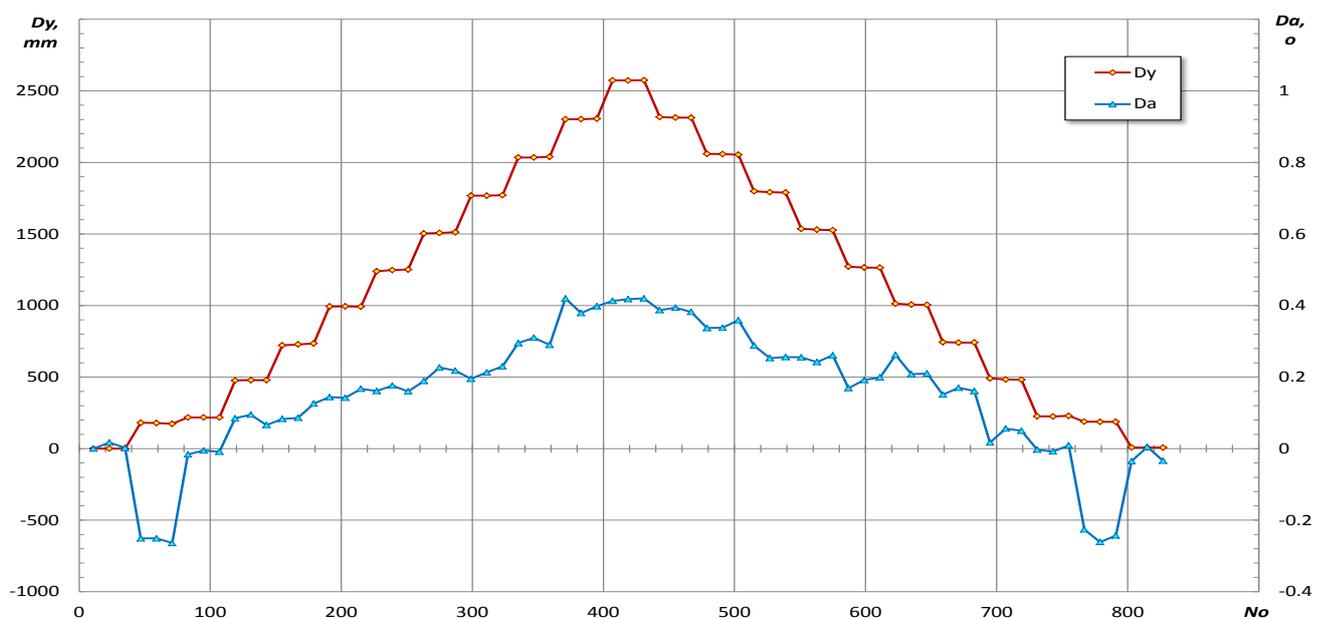


Рисунок 5 Вертикальное и угловое смещение концевое сечения консоли

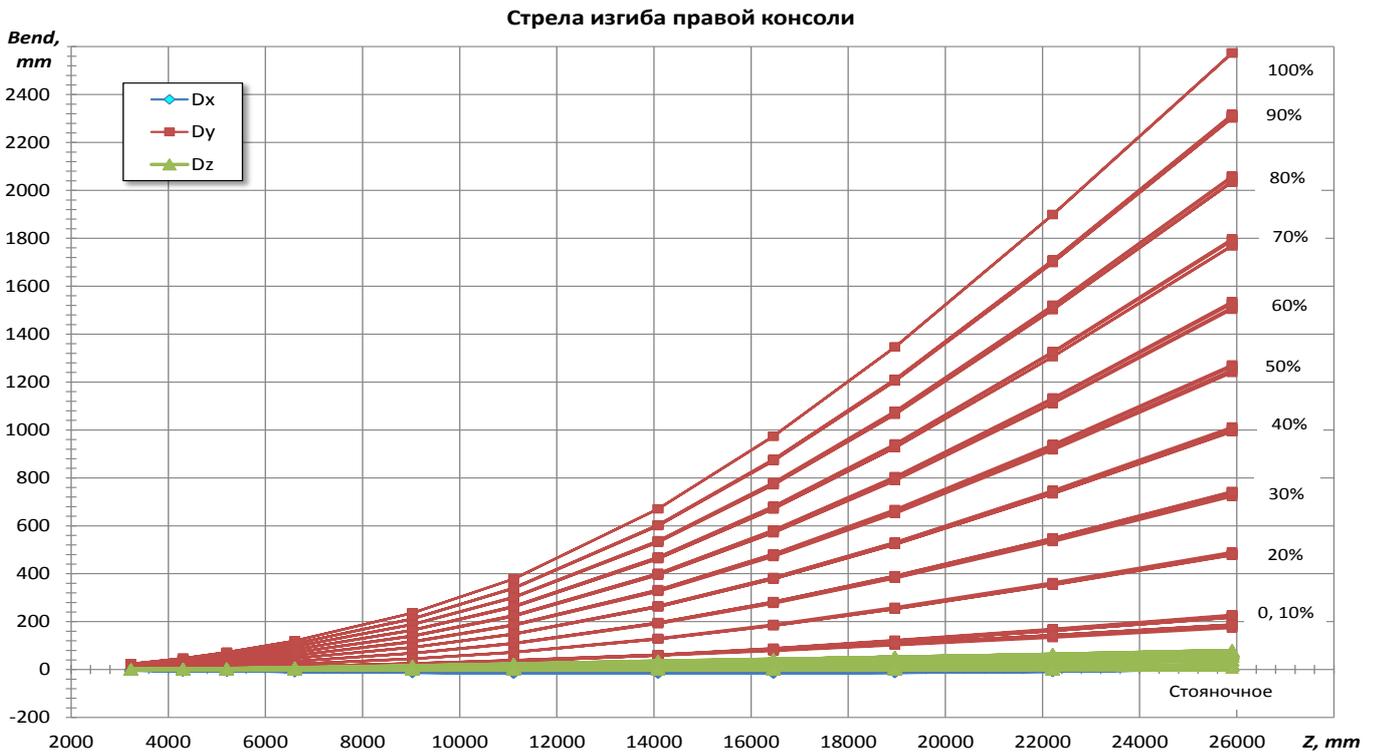


Рисунок 6 Распределение по сечениям деформации изгиба (вертикального смещения) консоли крыла

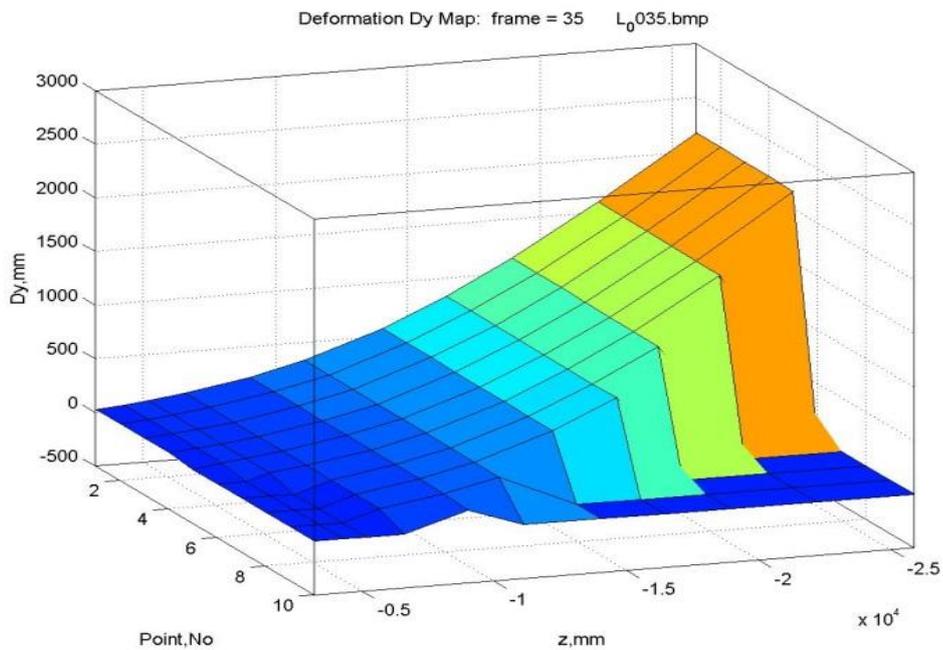


Рисунок 7 Поле вертикальных отклонений консоли при максимальной нагрузке

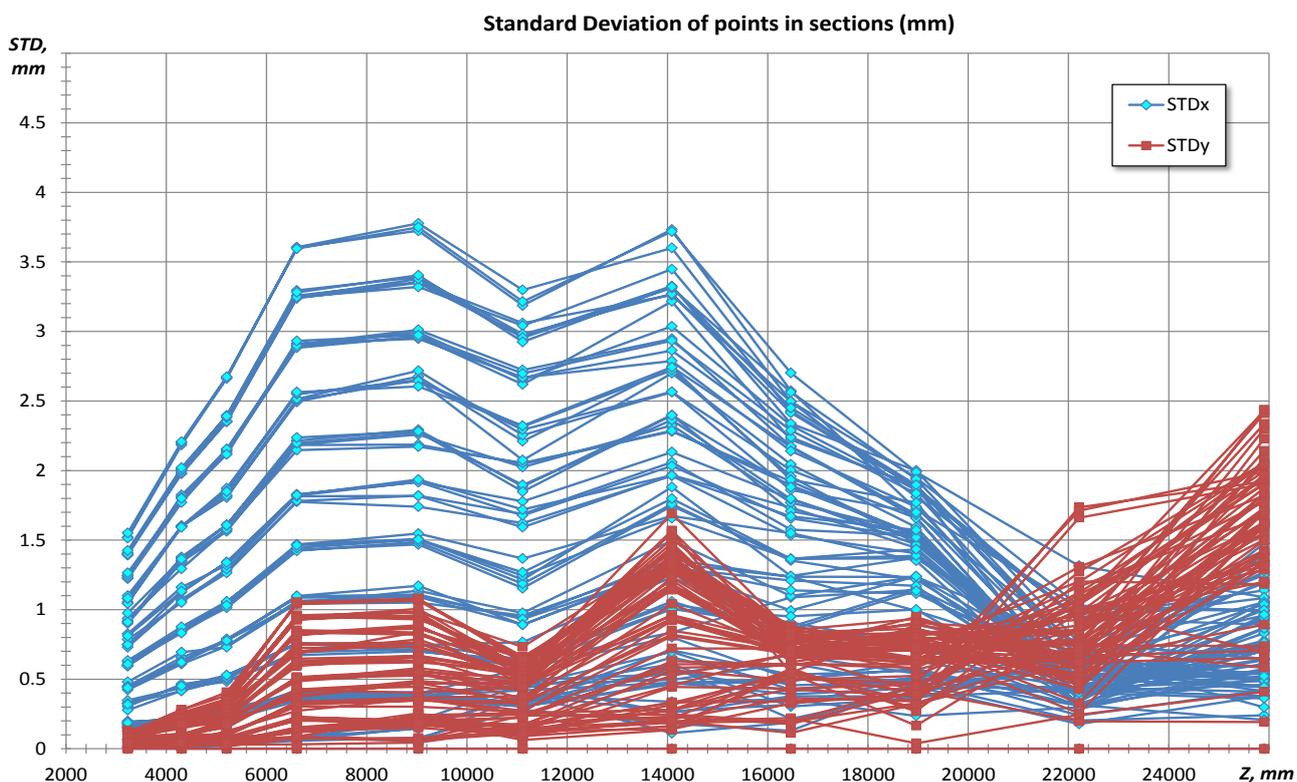


Рисунок 8 Распределение по сечениям стандартных отклонений точек по двум координатам

7. Заключение

Создан действующий макетный образец мобильной видеogramметрической измерительной системы, предназначенной для оперативных бесконтактных измерений и визуализации распределенных деформаций крупногабаритных объектов в машиностроении.

Разработана двухэтапная методика калибровки измерительной системы, обеспечивающая определение параметров рабочей характеристики ВГМ в сложных стендовых, цеховых и полевых условиях. На первом этапе рекомендовано определять параметры внутреннего ориентирования камеры в лабораторных

условиях, а на втором – параметры внешнего ориентирования в условиях проведения эксперимента.

Сформулирована пошаговая методика измерений и обработки с помощью разработанной измерительной системы.

Практическая демонстрация работы измерительной системы была проведена при измерениях деформаций натурального крыла нового образца транспортного самолета в эксплуатационных условиях стенда в ходе промышленных наземных ресурсных испытаний. Максимальная дистанция измерений при этом составила 26 м, а максимальный характерный размер области измерений до 12 м.

В работе достигнута цель – совершенствование метода видеограмметрии, направленное на оперативные бесконтактные измерения и визуализацию распределенных деформаций крупногабаритных объектов в машиностроении.

Продемонстрирована эффективность разработки, которая состоит в обеспечении возможности оперативных бесконтактных измерений деформаций крупногабаритных объектов машиностроения на экспериментальных стендах, в цеховых и полевых условиях.

Библиографический список

1. Garibaldi A.V., Kulesh V.P. Contactless measurements with high point density and the construction of three-dimensional numerical models of complexly shaped bodies // Measurement Techniques, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 25 - 30.
2. Князь В.А. Оптическая система захвата движения для анализа и визуализации трехмерных процессов // Юбилейная 25-я Международная научная

конференция «ГРАФИКОН' 2015». Сборник трудов. (Протвино, 22-25 сентября 2015). – Протвино: Институт физико-технической информатики, 2015. С. 232 - 236.

3. Vic-3D 2007 Testing Guide (Correlatedsolutions, USA), available at: <http://classes.engr.oregonstate.edu/mime/winter2009/me453-001/VIC-3D%20Testing%20Guide.pdf>

4. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. 2011. № 2. С. 92 - 100.

5. Cecchi E., van Wyk de Vries B., Lavest J.M., Harris A., Davies M. N-view reconstruction: a new method for morphological modelling and deformation measurement in volcanology // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, vol. 123, no. 1-2, pp. 181 - 201.

6. Farnood Ahmadi F. Integration of industrial videogrammetry and artificial neural networks for monitoring and modeling the deformation or displacement of structures // Neural Computing & Applications, 2017, vol. 28, no. 12. pp. 3709 - 3716.

7. Кулеш В.П., Фонов С.Д. Измерение параметров движения и деформации модели самолета в аэродинамической трубе методом видеogramметрии // Ученые записки ЦАГИ. 1998. Т. XXIX, № 1-2, С. 165 – 176.

8. Burner A.W., Tianshu Liu. Videogrammetric model deformation measurement technique // Journal of Aircraft, 2001, vol. 38, no.4, pp. 745 – 754.

9. Kuruliuk K.A., Kulesh, V.P. Non-contact measurement of helicopter device position in wind tunnels with the use of optical videogrammetry method // AIP Conference

Proceedings, 13 October 2016, vol. 1770, issue 1, available at:
<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4963948>

10. Nathan A. Pitcher, Jonathan T. Black, Mark F. Reeder, and Raymond C. Maple. Videogrammetry dynamics measurements of a lightweight flexible wing in a wind tunnel // 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, California, May 2009, AIAA Paper 2009-2416, available at:
<https://www.photomodeler.com/applications/documents/PMV%20Paper%202.pdf>

11. Кулеш В.П., Курулюк К.А. Многоканальная видеogramметрическая система для бесконтактных измерений деформации демонстратора крыла с упругими органами управления // XXVII научно-техническая конференция по аэродинамике. Сборник трудов. (Жуковский, Московская область, 21-22 апреля 2016). – Жуковский: ЦАГИ, 2016. С. 152.

12. Кулеш В.П. Измерения деформации адаптивной носовой части крыла в аэродинамической трубе методом видеogramметрии // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 6. С. 100 - 109.

13. Ефимов А.И., Ильин В.Н. Методология определения формы объектов по данным видеоряда камеры // Труды МАИ. 2017. № 95. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=84590>

14. Zachary M. Moratto, Michael J. Broxton, Ross A. Beyer, Mike Lundy and Kyle Husmann. Ames Stereo Pipeline, NASA's Open Source Automated Stereogrammetry Software // 41st Lunar and Planetary Science Conference, 2010, available at:
<https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/2364.pdf>

15. Henrik Persson. Estimation of Forest Parameters Using 3D Satellite Data: Stereogrammetry, radargrammetry and interferometry. SLU Service/Repro, Uppsala/Alnarp, 2014, available at: https://pub.epsilon.slu.se/11658/1/persson_h_141119.pdf
16. Busarova M.V., Kulesh V.P. Deformation measurements of the wing with elastic operating control in wind tunnel flow // AIP Conference Proceedings 2016. International Conference on the Methods of Aerophysical Research, 1 January 2016, American Institute of Physics, vol. 1770, doi:10.1063/1.4963988
17. Ignatiev K.I, Stock S.R., Lee W.-K., Fezzaa K. Phase contrast stereometry: fatigue crack mapping in three dimensions // Philosophical Magazine, 2005, vol. 85, no. 28, pp. 3273 - 3300.
18. Назаров А.С. Фотограмметрия: пособие для студентов ВУЗов. – Минск, ТетраСистемс, 2010. - 398 с.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1984. - 831 с.
20. Mr.B. Mathankumar, Mrs.S. Jeyanthi. Implementation of fast normalized cross correlation algorithm for large scale image search // International Journal of Engineering Research and General Science, 2014, vol. 2, no. 6, pp.628 – 636, available at: <http://oaji.net/articles/2014/786-1419482298.pdf>