


Научная статья
УДК 539.43; 535.8
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179107>

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ КОНСОЛИ КРЫЛА САМОЛЕТА В ПОЛЕТЕ МЕТОДОМ ВИДЕОГРАММЕТРИИ

Владимир Петрович Кулеш¹, Ксения Александровна Курулюк² , Григорий Евгеньевич Нонкин³,
Иван Владимирович Сенюев⁴

^{1, 2, 3, 4} Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
Жуковский, Московская область, Россия

^{1, 3, 4} mera@tsagi.ru

² ksusha_kp_13@mail.ru 

Аннотация. Методом видеограмметрии (ВГМ) измерены параметры движения и деформации консоли крыла и органов управления натурального самолета на стоянке и в полете. В измерениях использовалась специализированная видеограмметрическая система, содержащая один монограмметрический измерительный канал, предназначенный для измерения параметров деформации консоли, перемещений элерона и интерцепторов. Дано краткое описание метода, особенностей обработки и получения результатов. Получены численные значения параметров деформации изгиба консоли крыла в двух плоскостях.

Ключевые слова: монограмметрические измерения, бесконтактные оптические методы, деформация крыла в полете, бесконтактные измерения крупногабаритных объектов

Для цитирования: Кулеш В.П., Курулюк К.А., Нонкин Г.Е., Сенюев И.В. Измерение параметров движения и деформации консоли крыла самолета в полете методом видеограмметрии // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 57–66. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179107>


Original article

MOTION AND AIRCRAFT WING CONSOLE DEFORMATION PARAMETERS MEASURING IN FLIGHT BY THE VIDEOGRAMMETRY METHOD

Vladimir P. Kulesh¹, Kseniya A. Kurulyuk² , Grigorii E. Nonkin³, Ivan V. Senyuev⁴

^{1, 2, 3, 4} Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),
Zhukovsky, Moscow Region, Russia

^{1, 3, 4} mera@tsagi.ru

² ksusha_kp_13@mail.ru 

Abstract

The wing shape and other aircraft structural elements sustain noticeable changes under the impact of distributed aerodynamic and mass-inertial forces, which affect the aircraft flight performances. Most experimental studies of motion and deformation of the aircraft in the airflow are being conducted in the wind tunnels on the elastic and dynamically similar models. The model structural-load-bearing scheme differs inevitably from the wing full-scale scheme, which implicates the difference of aerodynamic characteristics of the model and full-scale wing. Thus, measurements of the aircraft wing deformations occurring directly during the real flight are necessary.

Lately, contactless optical methods, particularly digital videogrammetry methods (VGM), showed themselves to good advantage for distributed deformations measuring of models in the flow of the wind tunnels. The VGM

high informativity is stipulated by the fact that information on hundreds and thousands points of the object can be extracted simultaneously from the single image. For the past decades, in TsAGI (Central Aerohydrodynamic Institute) optical methods of videogrammetry has been actively applied and improved in wind tunnels and at experimental test benches.

The main purpose of the presented work consisted in improving the videogrammetry method and developing specialized monogrammetry system (with a single camera) to ensure contactless measurements of motion parameters and aircraft wing console deformation in flight.

The objectives of the work were:

- videogrammetry method adaptation, including software and hardware parts, to the object and test conditions;
- development of the measuring monogrammetric VGM-system for installing and functioning on board the full-scale aircraft on the ground and in flight;
- developing the express-calibration technique of the VGM-system in ground conditions in the hangar;
- measuring motion parameters and aircraft wing console deformations in both ground tests and in flight.

The article presents a brief description of the videogrammetry method, specifics of calibration and results processing. Numerical parameters of bending deformation and torsion of the wing console, aileron and spoilers were obtained. It was found that the deflection of the wing console in cruising regimes was 850–900 mm.

Keywords: monogrammetry measurements, contactless optical methods, wing deformation in flight, contactless measurements of large-sized objects

For citation: Kulesh V.P., Kurulyuk K.A., Nonkin G.E., Senyuev I.V. Motion and Aircraft Wing Console Deformation Parameters Measuring in Flight by the Videogrammetry Method. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 1, pp. 57–66. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179107>

Введение

Форма крыла и других элементов конструкции самолета в полете претерпевает заметные изменения под действием распределенных аэродинамических и массово-инерционных сил, что сказывается на летных характеристиках самолета [1]. Большинство экспериментальных исследований движения и деформации летательного аппарата в потоке воздуха проводится в аэродинамических трубах на упругих и динамически подобных моделях самолета. Конструктивно-силовая схема модели неизбежно отличается от схемы натурального крыла, что влечет за собой различие аэродинамических и прочностных характеристиках модели и натурального крыла [2, 3]. Поэтому необходимы измерения деформаций крыла самолета непосредственно во время реального полета.

Для измерения распределенных деформаций моделей в потоке аэродинамических труб в последнее время хорошо зарекомендовали себя бесконтактные оптические методы, в частности методы цифровой видеogramметрии (ВГМ) [4–7]. Высокая информативность метода ВГМ обусловлена тем, что из одного изображения можно извлечь информацию о сотнях и тысячах точек объекта одновременно [8, 9]. В ЦАГИ на протяжении десятков лет активно применяются и совершенствуются оптические методы видеogramметрии в аэродинамических трубах и на экспериментальных стендах [10–13].

Основной целью настоящей работы явилось совершенствование метода видеogramметрии и

разработка специализированной монограмметрической системы (с одной камерой) для обеспечения бесконтактных измерений параметров движения и деформации консоли и органов управления крыла среднемагистрального пассажирского самолета в полете.

Задачи работы:

- адаптация метода видеogramметрии, включая аппаратную и программную часть, к объекту и условиям испытаний;
- разработка измерительной монограмметрической ВГМ-системы для установки и функционирования на борту натурального самолета в испытаниях на земле и в полете;
- разработка методики экспресс-калибровки ВГМ-системы в наземных условиях в ангаре;
- измерения параметров движения и деформации консоли крыла, элерона и интерцепторов пассажирского самолета в наземных испытаниях и в полете.

Метод видеogramметрии

Суть метода видеogramметрии 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 стереogramметрии [14–18], при использовании которого получают два изображе-

ния 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 [19]. Однако в реальных экспериментальных установках и на стендах не всегда имеется возможность размещения двух камер в нужных точках.

В данной работе применялся один из вариантов метода видеограмметрии, при использовании которого для измерений достаточно только одной цифровой камеры (метод монограмметрии), что является большим его преимуществом в сложных условиях при ограниченном обзоре окружающего пространства, например из иллюминатора самолета.

В схеме монограмметрии для разрешения неопределенности задачи восстановления координат используется априорная информация, полученная из других источников. В качестве априорной информации может выступать заранее известная информация о закономерностях движения и деформации объекта. Такая дополнительная информация может быть получена из чертежа, трехмерной CAD-модели или предварительных инструментальных измерений. На основании априорной информации математически формулируется параметрическая гипотеза формы, движения и деформации поверхности объекта, которая, будучи дополненной к рабочей характеристике, замыкает систему уравнений и позволяет решить задачу определения искомым геометрических параметров объекта в пространстве.

В общем случае рабочая характеристика, т. е. система уравнений преобразования координат u, v точек изображения в координаты x, y, z точек объекта, может быть представлена в виде системы двух нелинейных уравнений:

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

где x_0, y_0, z_0 — координаты центра приемного объектива в системе координат объекта, мм;

u_0, v_0 — координаты главной точки изображения, т. е. точки пересечения оптической оси приемного объектива с плоскостью чувствительной матрицы цифровой камеры, пикс;

w_0 — задний отрезок приемного объектива, пикс;

M_{ij} — элементы матрицы направляющих косинусов системы координат камеры в системе координат объекта, т. е. матрицы вращения [20].

Основным источником погрешности измерений методом видеограмметрии являются гео-

метрические искажения изображения, вносимые реальным объективом. Для минимизации влияния геометрических искажений выполняется коррекция измеренных координат u', v' образов маркеров на изображении по формулам:

$$\begin{aligned} u &\approx u_0 + (u' - u_0)(1 - \delta); \\ v &\approx v_0 + (v' - v_0)(1 - \delta), \end{aligned}$$

где u' и v' — измеренные координаты точки искаженного изображения;

$$\delta = \frac{d}{w_0^2} \left[(u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2 \right];$$

d — безразмерный коэффициент дисторсии объектива.

По принятой в фотограмметрии терминологии группу параметров измерительной системы $P = (x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$, характеризующих положение и ориентацию камеры в пространстве измерения в системе координат объекта, принято называть параметрами внешнего ориентирования, а группу параметров $Q = (u_0, v_0, w_0, d)$, относящихся к системе координат изображения, — параметрами внутреннего ориентирования. Численные значения параметров рабочей характеристики определяются в процессе калибровки измерительной системы.

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 позволяет более точно привязать результаты измерений к координатам исследуемой поверхности, а также избежать сложных операций корреляционного анализа [21].

Параметрическая гипотеза

В используемом методе монограмметрии для разрешения неопределенности задачи восстановления искомым пространственных координат использовалась априорная информация о зависимости координаты z маркеров от двух других координат. Эта операция выполнялась с применением полученных при калибровке параметров рабочей характеристики и модели изгиба крыла.

В работе правая декартова измерительная система координат задана так, что координатная ось Oz направляется вдоль минимального смещения точек контролируемой консоли, а ось Oy — максимального. Основное предположение, используемое в принципе монограмметрии в данной работе, — это плоскопараллельность перемещения сечений без угловых наклонов и разворотов вокруг координатных осей Ox и Oy . При измерениях деформации

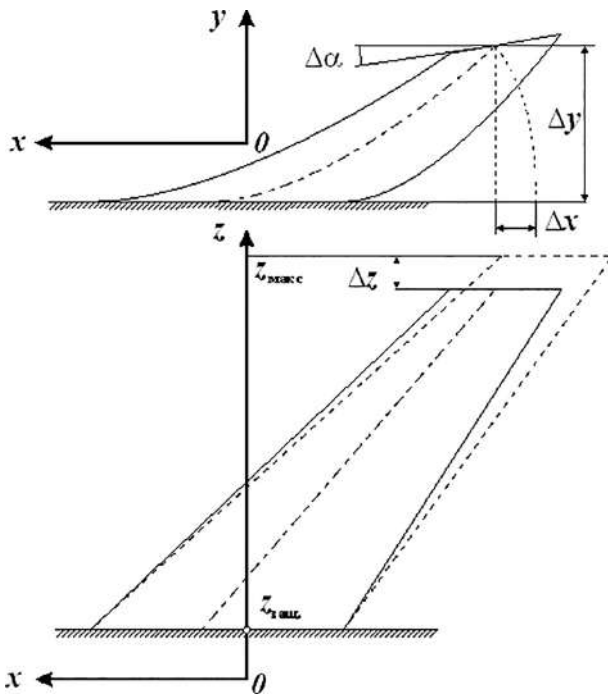


Рис. 1. Схема изгиба стреловидного крыла

крыла самолета хорошо себя зарекомендовала модель консольно закрепленной удлиненной плоской балки, показанная на рис. 1.

Наблюдаемые точки поверхности крыла группируются по сечениям, перпендикулярным координатной оси Oz. При этом можно считать, что каждое сечение как целое претерпевает параллельные поступательные смещения Δx, Δy по соответственным осям и поворот на угол Δα вокруг оси Oz. Основным компонентом упругой деформации такой балки является изгиб в плоскости ее продольной оси и нормали.

При очень малых значениях изгиба $\Delta y/z_{\text{макс}} < 0,01$ значения координаты z точек сечения можно считать неизменными: $\{z\} = \text{const}$. При больших изгибах $\Delta y/z_{\text{макс}} < 0,1$ становится значимым изменение координаты z. Если известны углы стреловидности ϑ и V-образности крыла ν, то хорошие результаты дает приближенная оценка по формуле

$$\Delta z = \Delta y \cdot \cos \vartheta \cdot \left[\text{tg } \vartheta + \frac{2\Delta y}{3 \cdot (z - z_{\text{защ}})} \right],$$

где $z_{\text{защ}}$ — координата «защемления» крыла.

При еще больших изгибах консоли или в случаях неприменимости модели консольно закрепленной балки в данной работе применялась притяжка методом наименьших квадратов каждого сечения к исходному недеформированному состоянию по координатам Δx, Δy, Δz и углу Δα.

Первичным результатом измерения методом видеogramметрии в каждом отсчете является массив

текущих значений трехмерных координат {x,y,z} всех маркерных точек на контролируемой поверхности. Для анализа и наглядного представления о поведении объекта измерения определяются обобщенные параметры изгиба и кручения, распределенные по заданным сечениям поверхности.

Так как основным предположением, заложенным в основу принципа монограмметрии в данной работе, является плоскопараллельность перемещения сечений без угловых наклонов и разворотов вокруг координатных осей Ox и Oy, то вычисления параметров деформации изгиба и кручения выполнялись совмещением методом наименьших квадратов координат x и y всех точек каждого сечения в недеформированном состоянии с координатами x' и y' в деформированном состоянии (рис. 2). Деформации изгиба Δx и Δy определялись как смещения по осям центральной точки x_a, y_a на осевом центре вращения сечения (точка на оси изгиба), а деформация кручения Δα определялась как поворот маркеров сечения вокруг этой точки по формулам:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} x_a + \cos(\Delta\alpha) \cdot (x - x_a) - \sin(\Delta\alpha) \cdot (y - y_a) + \Delta x \\ y_a + \sin(\Delta\alpha) \cdot (x - x_a) + \cos(\Delta\alpha) \cdot (y - y_a) + \Delta y \end{pmatrix}.$$

Символ ↔ обозначает процедуру совмещения методом наименьших квадратов. Среднеквадратические отклонения $СКО_x$ и $СКО_y$, полученные при совмещении методом наименьших квадратов для каждого сечения, могут служить индикатором текущей общей погрешности измерений, включающей как инструментальную погрешность измерительной системы, так и влияние внешних возмущающих факторов.

С помощью предполетной экспресс-калибровки измерительной системы измерительная система координат была привязана к цифровой камере. Однако, как было установлено на этапе предварительной обработки результатов, регистрирующие цифровые камеры не оставались неподвижными в процессе измерений. Наибольшее влияние на окончательный результат оказывают

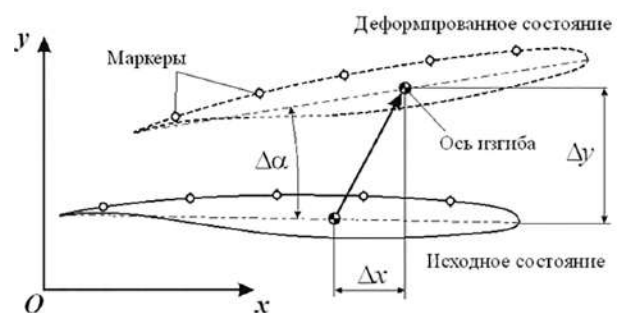


Рис. 2. Определение параметров деформации изгиба и кручения

неконтролируемые изменения положения камеры по координатной оси Oz . Согласно разработанной в ЦАГИ методике измерений, для компенсации влияния неконтролируемых смещений камеры была применена процедура покадровой привязки измерительной системы координат к объекту измерений методом автокалибровки по группе базовых маркеров, расположенных на участке поверхности модели с пренебрежимо малой деформацией [1, 5]. Эта операция позволяет разделить перемещения объекта как целого и смещения точек поверхности, обусловленные деформацией. При измерении общей деформации консоли в качестве базовых были выбраны маркеры в прикорневых сечениях в диапазоне координаты z от 5,1 до 12,6 м. По базовым маркерам процедурой автокалибровки определялись текущие значения параметров P внешнего ориентирования рабочей характеристики, из которых затем вычислялись параметры текущего положения в пространстве объекта измерения как целого и координаты маркеров во всех остальных сечениях в местной системе координат, связанной с базовым участком поверхности. Параметры P характеризуют текущее положение самой камеры в исходной СК.

В большинстве случаев при автокалибровке возникает проблема, состоящая в том, что участка, не подверженного деформации, практически не существует. Для случаев измерения деформации удлиненных объектов, типа консольно заземленной плоской балки, была разработана методика коррекции результата измерения деформаций изгиба и кручения, основанная на условии, что в месте заземления производная кривой распределения параметра деформации должна быть равна нулю. Согласно этой методике, группа сечений с базовыми маркерами выбирается на участке поверхности, примыкающем к месту заделки, предположительно наименее подверженном деформации. Для этих базовых сечений вычисляются параметры деформации Δx , Δu и $\Delta \alpha$ в текущей измерительной СК. Зависимости этих параметров от координаты z аппроксимируются полиномами заданной (обычно второй) степени. Для зависимостей $\Delta x(z)$ и $\Delta u(z)$ строятся касательные в точке заделки $z = z_0$ и поправленные значения линейных смещений отсчитываются от этих касательных.

На рис. 3 приведен пример состояний деформации крыла самолета по оси Oy и углу α до коррекции (*a*) и после коррекции (*b*). Значение координаты «заземления» было принято равным $z_{\text{зазем}} = -4000$ мм. Сплошные розовые линии представляют аппроксимационные полиномы второй степени, рассчитанные по результатам измерения отклонения Δu в пяти первых сечениях, а синие пунктирные — касательные в точке $z_{\text{зазем}}$. Результирующие значения

смещений сечений отсчитывались от соответствующих касательных. Для поправки результатов измерения деформации кручения следует вычитать значение аппроксимирующего полинома $\Delta \alpha(z_0)$ в точке заделки $z = z_0$.

Объект измерений и бортовая видеограмметрическая система

Объектом испытаний стала левая консоль крыла натурального самолета. В рамках работы измерены параметры движения и деформации левой консоли крыла натурального самолета на стоянке и в полете. Испытания в наземных условиях предполагали пробные измерения параметров изгиба консоли крыла под действием вынуждающей нагрузки с помощью гидравлических силовозбудителей. В полете было предусмотрено также измерение деформации изгиба консоли крыла на всех режимах полета.

Для выполнения измерений была разработана специальная видеограмметрическая система на основе принципа монограмметрии, согласно которому измерения выполняются с помощью одной цифровой камеры с привлечением априорной информации об объекте измерения.

Структурная схема видеограмметрической системы показана на рис. 4. Видеограмметрический канал бортовой системы включал одну цифровую камеру 1 с высоким разрешением 11 МП с размером матрицы 4037×2692 пикс, оснащенную объективом с фокусным расстоянием $F = 50$ мм, контроллер камеры 2, сетевой коммутатор 3, компьютер 4 и набор маркерных меток 5. Камера была жестко закреплена по левому борту напротив иллюминатора.

На поверхность консоли и органов управления были нанесены сетки маркеров, расположенных в 14 сечениях, параллельных плоскости симметрии самолета. Сетка для камеры cam1 содержала 115 маркеров, расположенных в 11 сечениях: 1, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 и 14 (дополнительные ряды маркеров на сечениях 2, 4, 9 использовались для следующего этапа эксперимента — измерения закрылков консоли). Расстояние между рядами было рассчитано предварительно, согласно ВГМ, таким образом, чтобы маркеры заполняли пространство кадра наиболее полно и равномерно. Расстояние L1 соответствует расстоянию до 1-го ряда маркеров, расстояние L14 — до 14-го ряда.

Маркеры были изготовлены из черной бархатной самоклеящейся бумаги в форме эллипсов и наклеены на белую поверхность крыла так, чтобы большая ось была направлена на камеру. Бумага предварительно прошла опробование на влагу и сложные температурные условия. Размеры маркеров были рассчитаны заранее таким образом, чтобы

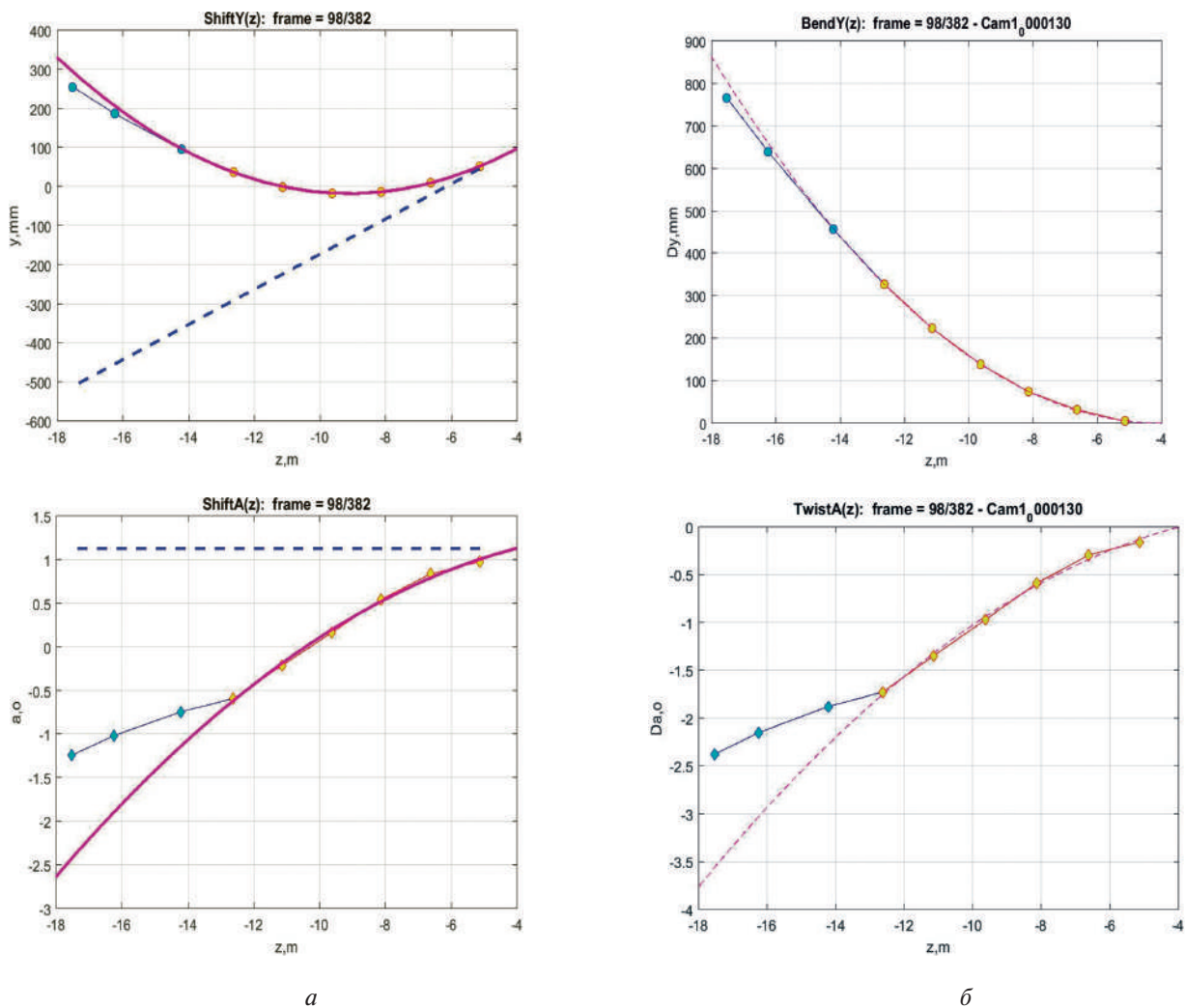


Рис. 3. Коррекция проявления нежесткости базовых участков: а – до коррекции; б – после коррекции

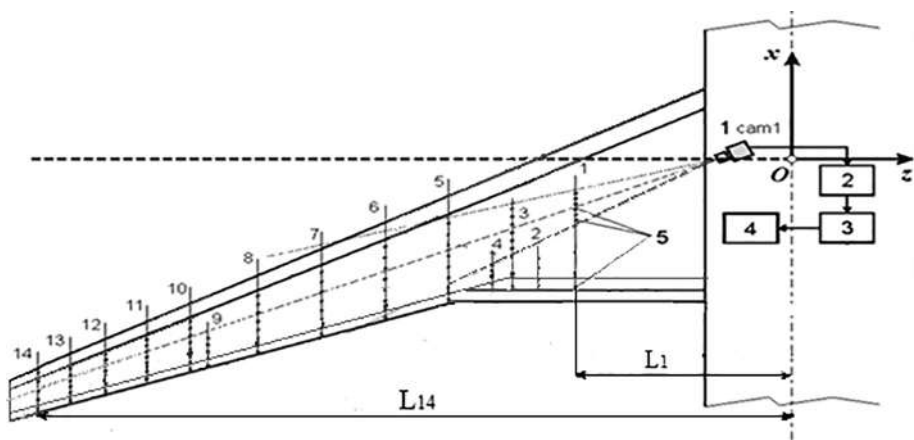


Рис. 4. Структурная схема бортовой ВГМ-системы

на изображении они образовали пятна в форме круга с приблизительно одинаковыми размерами. В конечном сечении эллипсы имели размеры 250×28 мм, а в корневом – 12×5 мм.

Предварительные значения координат маркеров на поверхности крыла и органов управления были получены в процессе разметки и наклеивания. Вертикальная координата у маркеров в каждом сечении оценивалась по конструкционной 3D-модели крыла. Погрешность таких измерений оценена в 2–3 мм. Результаты этих измерений послужили начальным приближением для последующих более точных измерений методом видеограмметрии.

Калибровка видеограмметрической системы

Калибровка бортовой видеограмметрической системы была выполнена в два этапа. Первый этап проводился в лабораторных условиях с помощью специальной установки для калибровки измерительных ВГМ-систем, которая представляет собой тест-объект планшетного типа. На тест-объекте расположены 80 базовых маркеров по прямоугольной сетке 10×8 с интервалом 100 мм по горизонтальной и вертикальной осям. Координаты маркеров измерены с помощью координатно-измерительной машины с погрешностью 0,02 мм. Результатом первого этапа калибровки камер стали фотограмметрические параметры внутреннего ориентирования для каждой камеры.

Второй этап выполнялся в условиях ангара при полностью смонтированной и настроенной измерительной системе с использованием мобильных средств калибровки – тест-реек. На данном этапе обеспечивалась привязка измерительной системы координат к объекту измерений. По его результатам были определены фотограмметрические параметры внутреннего ориентирования камер и оценена инструментальная погрешность.

Эксперимент и результаты измерений

Экспериментальная установка была создана на базе среднемагистрального пассажирского самолета. В плане эксперимента были предусмотрены пробные наземные измерения и зачетные измерения в двух полетах. Целью пробных наземных измерений была проверка работоспособности измерительной ВГМ-системы. Были выполнены измерения деформации консоли крыла при ее двунаправленном нагружении с помощью двух гидравлических силовозбудителей, а также измерения параметров движения закрылков при их тестовом выпуске. Для исключения влияния перемещения самолета как целого вблизи крыла были установлены неподвижно четыре тест-рейки,

к которым при обработке результатов привязывалась местная измерительная система координат. На рис. 5 приведен график координат $\{x, y\}$ маркеров неподвижных тест-реек и поверхности консоли в исходном состоянии и при максимальных нагрузках вверх и вниз. Максимальная стрела прогиба на конце консоли составила ± 80 мм, что соответствовало величине хода поршней силовозбудителей.

В двух полетах были выполнены серии отсчетов (в первом около 400, а во втором около 1000) на заданных режимах полета. На рис. 6 приведены примеры зарегистрированных на взлете рабочих цифровых изображений с расставленной нумерацией маркеров.

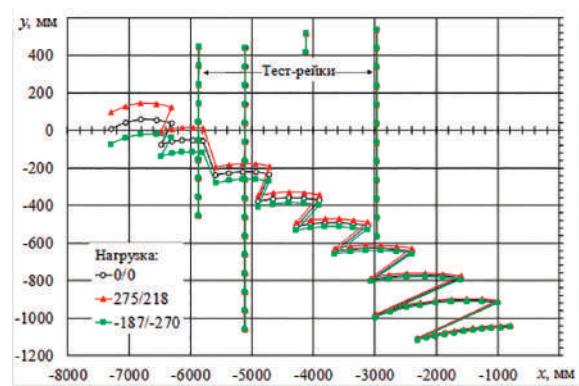


Рис. 5. Координаты маркеров в при нулевой, максимальной вверх и максимальной вниз нагрузке



Рис. 6. Рабочее цифровое изображение ВГМ-канала

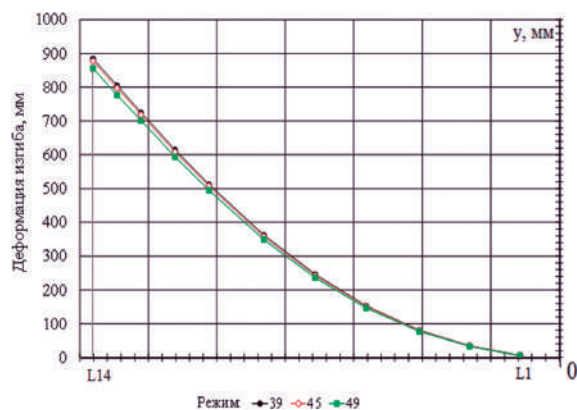


Рис. 7. Деформация изгиба консоли при полете с числом Маха $M = 0,8$

В первом полете произведены измерения на 42 режимах (около 400 отсчетов), а во втором — на 106 режимах полета (около 1000 отсчетов), включая режимы взлета, крейсерского полета и посадки. В результате обработки получены численные параметры изгиба консоли в каждом сечении. График распределения параметров деформации изгиба консоли в полете с числом Маха 0,8 для сечений 1, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 и 14 представлен на рис. 7. Установлено, что стрела прогиба консоли крыла в последнем сечении L14 на крейсерских режимах составляла 850–900 мм. В полете наблюдалось «отжатие» скоростным воздушным напором элерона. При этом «отжатие» задней кромки интерцепторов составляло 10–15 мм вверх.

Выводы

Впервые с помощью отечественной технологии видеogramметрии проведены полноценные измерения параметров движения и деформации консоли крыла натурального самолета на стоянке и в двух полетах.

Разработана бортовая видеogramметрическая система, установленная в фюзеляже самолета.

С помощью разработанной ВГМ-системы выполнены пробные наземные измерения параметров деформации консоли под действием гидравлических силовозбудителей и свободного движения закрылков. В первом полете произведены измерения на 42 режимах, а во втором — на 106 режимах полета, включая режимы взлета, крейсерского полета и посадки.

В целом можно считать опыт применения метода видеogramметрии для измерений параметров движения и деформации элементов конструкции натурального самолета в полете успешным и рекомендовать разработанную технологию для дальнейшего использования в летных испытаниях.

Список источников

1. Горбушин А.Р., Ишмуратов Ф.З., Нгуен В.Н. Исследование зависимости упругих деформаций «жестких» аэродинамических моделей от их геометрических и конструктивных параметров // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 45–60. DOI: 10.34759/vst-2022-2-45-60
2. Курулюк Д.В. Программное обеспечение для автоматизации проведения прочностных испытаний // Автоматизация в промышленности. 2017. № 4. С. 51–53.
3. Богатырев М.М. Исследование деформации планера самолёта с помощью волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 109–119.
4. Liu T., Burner A.W., Jones T.W., Barrows D.A. Photogrammetric techniques for aerospace applications // Progress in Aerospace Sciences. 2012. No. 54. pp. 1–58.
5. 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.
6. Pitcher N.A., Black J.T., Reeder M.F., Maple R.C. Videogrammetry dynamics measurements of a lightweight flexible wing in a wind tunnel // 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference (4–7 May 2009; Palm Springs, California). AIAA Paper 2009–2416. URL: <https://www.photomodeler.com/applications/documents/PMV%20Paper%202.pdf>
7. Barrows D.A. Videogrammetric Model Deformation Measurement Technique for Wind Tunnel Applications // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (8–11 January 2007; Reno, Nevada, USA). AIAA Paper 2007–1163.
8. 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. DOI: 10.1007/s11018-011-9680-5
9. Farnood A.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. DOI: 10.1007/s00521-016-2255-2
10. Kurulyuk K.A., Kulesh V.P. Non-contact measurement of helicopter device position in wind tunnels with the use of optical videogrammetry method // 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (June 27 - July 3 2016; Perm), p. 030006. DOI: 10.1063/1.4963948
11. Жаренов И.А., Кулеш В.П., Курулюк К.А. Измерение методом видеogramметрии полей деформации панелей в результате ударного повреждения // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96605>
12. Копотева К.А., Кулеш В.П., Наумов С.М. Применение

- оптического метода видеogramметрии для измерений полей нормальной деформации элементов конструкций летательного аппарата // Мир измерений. 2013. № 10. С. 8–12.
13. Бусарова М.В., Желонкин С.В., Кулеш В.П., Курюлюк К.А. Применение оптического метода видеogramметрии для измерения полей нормальной деформации панели фюзеляжа самолета // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 52–60. DOI: 10.34759/vst-2020-2-52-60
 14. Persson H. Estimation of Forest Parameters Using 3D Satellite Data: Stereogrammetry, radargrammetry and interferometry. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. 2014, pp. 15–18. URL: https://pub.epsilon.slu.se/11658/1/persson_h_141119.pdf
 15. Moratto Z.M., Broxton M.J., Beyer R.A. et al. Ames Stereo Pipeline, NASA's Open Source Automated Stereogrammetry Software // 41st Lunar and Planetary Science Conference (1–5 March 2010; Woodlands, Texas). 2010. URL: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/2364.pdf>
 16. Князь В.А. Оптическая система захвата движения для анализа и визуализации трехмерных процессов // ГРАФИКОН'2015: Сборник трудов 25-й Международной конференции (22–25 сентября 2015; Протвино, Россия). Протвино: Изд-во ИФТИ, 2015. С. 232–236.
 17. Ignatiev K.I., Lee W.-K., Fezzaa K., Stock S.R. Phase contrast stereometry: fatigue crack mapping in three dimensions // The Philosophical Magazine A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics. 2005. Vol. 85. No. 28, pp. 3273–3300. DOI: 10.1080/14786430500155387
 18. 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>
 19. Назаров А.С. Фотограмметрия: Учебное пособие. – Минск: ТетраСистемс, 2010. – 398 с.
 20. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы / Пер. И.Г. Арамановича (ред., пер.). – 6-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2003. – 831 с.
 21. Mathankumar B., Jeyanthi S. Implementation of fast normalized cross correlation algorithm for large scale image search // International Journal of Engineering Research and General Science. 2014. Volume 2. No. 6, pp. 628–636. URL: <http://oaji.net/articles/2014/786-1419482298.pdf>

References

1. Gorbushin A.R., Ishmuratov F.Z., Nguyen V.N. Studying dependence of “RIGID” aerodynamic models elastic deformations on their geometric and design parameters. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 45–60. DOI: 10.34759/vst-2022-2-45-60
2. Kurulyuk D.V. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2017, no. 4, pp. 51–53.
3. Bogatyrev M.M. Studying an aircraft airframe deformation with bragg lattice based fiber-optic sensors. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 109–119.
4. Liu T., Burner A.W., Jones T.W., Barrows D.A. Photogrammetric techniques for aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2012, no. 54, pp. 1–58
5. Tret'yakova T.V., Tret'yakov M.P., Vil'deman V.Eh. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2011, no. 2, pp. 92–100.
6. Pitcher N.A., Black J.T., Reeder M.F., Maple R.C. Videogrammetry dynamics measurements of a lightweight flexible wing in a wind tunnel. *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference (4-7 May 2009; Palm Springs, California)*. AIAA Paper 2009–2416. URL: <https://www.photomodeler.com/applications/documents/PMV%20Paper%202.pdf>
7. Barrows D.A. Videogrammetric Model Deformation Measurement Technique for Wind Tunnel Applications. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (8-11 January 2007; Reno, Nevada, USA)*. AIAA Paper 2007–1163.
8. 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. DOI: 10.1007/s11018-011-9680-5
9. Farnood A.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. DOI: 10.1007/s00521-016-2255-2
10. Kurulyuk K.A., Kulesh V.P. Non-contact measurement of helicopter device position in wind tunnels with the use of optical videogrammetry method. *18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (June 27 - July 3 2016; Perm)*, p. 030006. DOI: 10.1063/1.4963948
11. Zharenov I.A., Kulesh V.P., Kurulyuk K.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 101. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96605>
12. Kopoteva K.A., Kulesh V.P., Naumov S.M. *Mir izmerenii*, 2013, no. 10, pp. 8–12.
13. Busarova M.V., Zhelonkin S.V., Kulesh V.P., Kurulyuk K.A. Application of optical videogrammetry technique for normal deformation fields of aircraft fuselage panel measuring. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 52–60. DOI: 10.34759/vst-2020-2-52-60
14. Persson H. *Estimation of Forest Parameters Using 3D Satellite Data: Stereogrammetry, radargrammetry and interferometry*. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. 2014, pp. 15–18. URL: https://pub.epsilon.slu.se/11658/1/persson_h_141119.pdf
15. Moratto Z.M., Broxton M.J., Beyer R.A. et al. Ames Stereo Pipeline, NASA's Open Source Automated Stereogrammetry Software. *41st Lunar and Planetary Science Conference*

- (1-5 March 2010; Woodlands, Texas). 2010. URL: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/2364.pdf>
16. Knyaz' V.A. *Trudy 25-i Mezhdunarodnoi konferentsii GRAFIKON'2015 (22–25 September 2015; Protvino, Rossiya)*. Protvino, IFTI, 2015, pp. 232–236.
 17. Ignatiev K.I., Lee W.-K., Fezzaa K., Stock S.R. Phase contrast stereometry: fatigue crack mapping in three dimensions. *The Philosophical Magazine A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, 2005, vol. 85, no. 28, pp. 3273–3300. DOI: 10.1080/14786430500155387
 18. Efimov A.I., Il'in V.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84590>
 19. Nazarov A.S. *Fotogrammetriya (Photogrammetry)*, Minsk, TetraSistems, 2010, 398 p.
 20. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*. New York, Dover Publications, 2000, 1152 p.
 21. Mathankumar B., Jeyanthi S. 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. URL: <http://oaji.net/articles/2014/786-1419482298.pdf>

Статья поступила в редакцию 23.01.2024; одобрена после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 09.02.2024.

The article was submitted on 23.01.2024; approved after reviewing on 08.02.2024; accepted for publication on 09.02.2024.