

Особенности применения видеограмметрии в экспериментальной аэродинамике

В. П. Кулеш

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского,
Жуковский, Московская обл., Россия, e-mail: mera@tsagi.ru

Кратко изложены особенности применения видеограмметрии в экспериментальной аэродинамике для бесконтактных измерений распределённых геометрических параметров положения, движения и деформации объектов. Отмечены особенности коррекции искажений изображения и калибровки видеограмметрических измерительных систем. Рассмотрены три концептуальные схемы измерений с использованием одной цифровой камеры.

Ключевые слова: экспериментальная аэродинамика, видеограмметрия, бесконтактные измерения, параметры положения, параметры движения, параметры деформации, схема измерений.

С начала 1990-х гг. метод цифровой видеограмметрии широко распространён в экспериментальной аэродинамике для бесконтактных измерений распределённых геометрических параметров положения, движения и деформации моделей и элементов конструкции летательных аппаратов [1–4]. Видеограмметрия является развитием традиционной фотограмметрии на основе современной техники цифровой регистрации изображений, вычислительной техники и средств численной обработки изображений. Компактность и высокая помехозащищённость цифровых камер с твёрдотельными светочувствительными матрицами обеспечили широкое применение видеограмметрии в сложных условиях аэродинамического эксперимента.

Основы видеограмметрии. Суть видеограмметрии заключается в определении трёх координат (x ; y ; z) каждой точки объекта в пространстве по двум координатам (u ; v) образа этой точки на цифровом изображении, полученном путём центральной проекции. Рабочую характеристику (функцию измерения) видеограмметрической системы можно представить как в основной прямой форме [4, 5], так и в обращённой форме, соответственно:

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

$$\left. \begin{aligned} u &= w_0 \frac{M'_{11}(x - x_0) + M'_{12}(y - y_0) + M'_{13}(z - z_0)}{M'_{31}(x - x_0) + M'_{32}(y - y_0) + M'_{33}(z - z_0)} + u_0; \\ v &= w_0 \frac{M'_{21}(x - x_0) + M'_{22}(y - y_0) + M'_{23}(z - z_0)}{M'_{31}(x - x_0) + M'_{32}(y - y_0) + M'_{33}(z - z_0)} + v_0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где u_0 , v_0 – координаты главной точки изображения (точки пересечения оптической оси приёмного объектива с плоскостью чувствительной матрицы цифровой камеры); w_0 – задний отрезок приёмного объектива; x_0 , y_0 , z_0 – координаты центра приёмного объектива (центра проекции) в системе координат объекта; M_{ij} – элементы матрицы вращения (матрицы направляющих косинусов [6]).

Элементы матрицы M принято представлять функциями углов последовательного вращения на углы α , β , γ системы координат камеры в системе координат объекта. В аэродинамическом эксперименте наиболее удобна следующая очередность вращения модели (объекта): сначала поворачивается платформа β -механизма вокруг вертикальной оси OY на угол β рыскания. При этом как целое поворачивается α -механизм с моделью, и координатные оси модели OX и OZ изменяют свою ориентацию. В повернутой системе координат с помощью α -механизма задается угол α тангажа модели вокруг новой оси OZ . На этом шаге вторично меняет свое положение ось OX . Третьим шагом является поворот модели в державке на угол γ крена вокруг оси OX . После этого матрица вращения приобретает развёрнутый вид

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $a_{11} = \cos\alpha\cos\beta$; $a_{12} = \sin\alpha$; $a_{13} = -\cos\alpha\sin\beta$; $a_{21} = \sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma$; $a_{22} = \cos\alpha\cos\gamma$; $a_{23} = \cos\beta\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma$; $a_{31} = \sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\cos\beta\sin\gamma$; $a_{32} = -\cos\alpha\sin\gamma$; $a_{33} = \cos\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma$.

Очередность вращения модели на заданные углы может быть разной. При этом изменяются значения углов α , β , γ и вид выражения (3), однако численные значения элементов матрицы M направляющих косинусов остаются неизменными. Матрица M' в обращённой рабочей характеристике равна обратной или, что в этом случае одно и то же, транспонированной матрице M .

По общепринятой в фотограмметрии терминологии группу $P = \{x_0; y_0; z_0; \alpha; \beta; \gamma\}$ параметров измерительной системы, 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 камеры (изображения), – фотограмметрическими параметрами внутреннего ориентирования. Величины u_0 и v_0 определяют главную точку изображения. Вели-

чина w_0 при регистрации удалённого объекта (измерения в дальней зоне) близка к фокусному расстоянию объектива, а при конечных расстояниях до объекта (измерения в ближней зоне) значение w_0 обычно больше фокусного расстояния в соответствии с формулой линзы. При использовании в качестве устройства регистрации центральной проекции оптических цифровых камер параметры внутреннего ориентирования u_0, v_0, w_0 удобнее выражать в единицах дискретности изображения – пикселах. К параметрам внутреннего ориентирования также принято относить и набор коэффициентов D , учитывающих геометрические искажения изображения объективом.

Для видеограмметрии, как и для фотограмметрии, характерна принципиальная неопределённость задачи восстановления трёх координат точки пространства по двум координатам образа этой точки на изображении, т. е. для трёх неизвестных x, y, z существуют только два уравнения (1). Можно сформулировать три пути решения этой неопределённости:

стереограмметрия, при которой регистрируют, по меньшей мере, два несовпадающих изображения объекта и образуют систему трёх уравнений, комбинируя две пары уравнений (1), полученных по двум изображениям;

структурированное освещение объекта, при котором известны траектории световых лучей. Эту дополнительную информацию используют для составления третьего, дополнительного к системе (1) уравнения;

использование для составления третьего уравнения к системе (1) априорной информации, полученной из сторонних источников.

Для применения стереограмметрии требуются две цифровые камеры, размещённые на экспериментальной установке. Это крайне затруднительно обеспечить в условиях ограниченного пространства и недостаточного оптического доступа, обычно характерных для аэродинамического эксперимента. Метод структурированного освещения предполагает размещение одной камеры и проектора лучей света, т. е. также двух точек оптического доступа, как в стереограмметрии. Поэтому наиболее востребованной в экспериментальной аэродинамике оказалась видеограмметрия с использованием априорной информации, реализуемая с помощью только одной цифровой камеры.

Коррекция геометрических искажений. Все реальные объективы формируют изображения, в большей или меньшей степени внося геометрические искажения. Эти искажения принято разделять на две группы: симметричные относительно оптической оси объектива – радиальная дисторсия, и несимметричные – тангенциальные. Дисторсия описывается полиномами чётных степеней тангенса угла $\tau = \text{tg}\vartheta$:

$$\delta \approx d_1 \tau^2 + d_2 \tau^4 + d_3 \tau^6 + \dots,$$

$$\text{где } \tau^2 = [(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2] / w_0^2.$$

Распространённой формой коррекции искажений изображения является аппроксимация дисторсии полиномом шестой

степени с членами, учитывающими тангенциальные искажения (модель влияния тонкого клина Брауна–Конради) [7]:

$$\left. \begin{aligned} \delta_u &\approx (u-u_0) \left(d_1 \tau^2 + d_2 \tau^4 + d_3 \tau^6 \right) + \\ &+ p_1 \left[\tau^2 + \frac{2(u-u_0)^2}{w_0^2} \right] + 2p_2 \frac{(u-u_0)^2(v-v_0)}{w_0^2}, \\ \delta_v &\approx (v-v_0) \left(d_1 \tau^2 + d_2 \tau^4 + d_3 \tau^6 \right) + \\ &+ p_2 \left[\tau^2 + \frac{(v-v_0)^2}{w_0^2} \right] + 2p_1 \frac{(u-u_0)^2(v-v_0)}{w_0^2}. \end{aligned} \right\}$$

Часто эту систему называют формулами Брауна. В такой записи коэффициенты геометрических искажений представлены в безразмерной форме. При этом группа параметров внутреннего ориентирования видеограмметрической системы имеет восемь коэффициентов $Q = (u_0; v_0; w_0; d_1; d_2; d_3; p_1; p_2)$. В случае малых углов и малой дисторсии, измерив координаты $(u'; v')$ точки деформированного изображения, можно с большой точностью восстановить координаты $(u; v)$ точки неискажённого изображения по формулам

$$u = u' - \delta_u; \quad v = v' - \delta_v.$$

Из результатов исследований и накопленного опыта следует, что геометрические искажения изображения зависят не только от качества объектива, но и от состояния диафрагмы. Минимальные геометрические искажения для большинства стандартных объективов реализуются при установке диафрагмы в диапазоне 5,6–8.

Маркировка поверхности. Для реализации метода видеограмметрии с помощью одной камеры на поверхность исследуемого объекта необходимо нанести контрастную структуру, хорошо различимую на цифровых изображениях. Элементы этой структуры принято называть маркерами. Эти элементы структуры должны обладать следующими основными свойствами:

распознаваемостью (каждый элемент такой структуры должен обеспечивать надёжное автоматическое распознавание элемента программой обработки как отдельного маркера в распределении освещённости изображения);

идентифицируемостью (каждый маркер должен обладать определённой индивидуальностью, дающей возможность его автоматического однозначного выделения среди других похожих маркеров на том же изображении или других в серии);

локализацией (каждому маркеру на поверхности объекта должна быть логически обосновано и однозначно поставлена в соответствие точка, координаты которой могут быть приняты за координаты точки измерения на объекте);

измеряемостью (на изображениях так же логически обосновано должна однозначно определяться точка, координаты которой могут быть измерены программой обработки и приняты за координаты образа соответствующего маркера на изображении).

Наиболее полно предъявленным требованиям отвечают маркеры в виде контрастных локальных пятен, белых

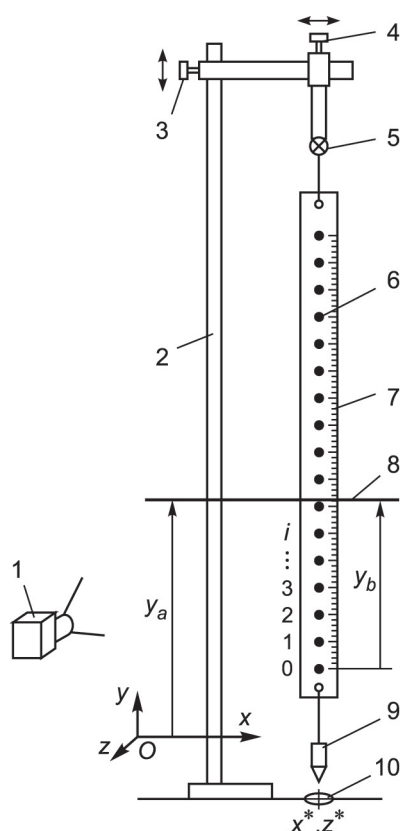


Рис. 1. Облегчённое контрольное приспособление типа тест-рейки и пример его применения при экспресс-калибровке:

1 – видеограмметрическая камера; 2 – стойка; 3, 4 – углы регулировки соответственно высоты и смещения/поворота; 5 – двухступенчатый шарнир; 6 – маркеры; 7 – шкала; 8 – горизонтальная лазерная плоскость; 9 – отвес; 10 – маркер на базовой поверхности

на темном фоне или черных на светлом, нанесённые на поверхность объекта в узлах заранее заданной сетки. Идентифицируемость маркеров обеспечивается строгой привязкой их к номерам узлов сетки. Маркер может быть нанесён непосредственно на поверхность исследуемого объекта либо размещён на дополнительном держателе – пилончике. При этом поверхность пилончика с маркером должна быть ориентирована перпендикулярно направлению на камеру, а сам маркер иметь круглую форму. При нанесении непосредственно на поверхность в общем случае маркер может быть эллиптическим (овальным), ориентированным большей осью в направлении цифровой камеры. Маркеры (форма и размер) должны быть такими, чтобы их образы (пятна) на изображении были приблизительно одинакового размера и имели форму, близкую к круглой. Поперечный размер маркеров на объекте должен быть оптимизирован для обеспечения необходимой локальности одновременно с максимальной точностью измерений. Практически диаметр маркера на изображении должен иметь 7–10 пикселей (или более). При испытаниях модели в потоке аэродинамической трубы безусловно требуется непосредственное нанесение маркеров на поверхность во избежание искажений обтекания пилончиком.

Особенности калибровки.

Параметры рабочей характеристики (1), (2) находят в результате калибровки видеограмметрической измерительной системы [4, 8]. Для условий аэродинамического эксперимента наиболее удобной является двухэтапная калибровка. На первом этапе определяются параметры внутреннего ориентирования отдельной калибровкой камеры [8]. Такая калибровка выполняется в контролируемых лабораторных условиях с использованием аттестованных тест-объектов и вспомогательных средств измерений. На этом этапе требуется повышенная точность измерений, прежде всего, для определения коэффициентов D геометрических искажений изображения. Следует особо отметить, что параметры внутреннего ориентирования, в том числе коэффициенты геометрических искажений, зависят от настройки камеры и приёмного объектива. При работе с мобильными видеограмметрическими системами на экспериментальных установках или в полевых условиях, как правило, не представляется возможным заранее настроить фокусировку и диафрагму приёмного

объектива. Поэтому камеру рекомендуется калибровать после измерений, сохраняя все настройки неизменными.

На втором этапе определение параметров внешнего ориентирования осуществляют экспресс-калибровкой смонтированной и полностью настроенной измерительной системы. Экспресс-калибровка выполняется непосредственно в месте измерений, при этом используются облегчённые мобильные контрольные приспособления и ручное измерительное оборудование. На рис. 1 приведена схема одного из таких мобильных устройств и пример его применения при экспресс-калибровке в пространстве измерений деформации модели самолета в аэродинамической трубе. Устройство содержит тест-рейку с рядом нанесённых вдоль продольной оси маркеров с заранее известными координатами их центров. С помощью стойки и отвеса рейка подвешивается в вертикальном положении последовательно над группой точек, горизонтальные координаты x^*, z^* которых заданы предварительной разметкой на базовой поверхности. Вертикальная координата $y_i^* = y_i + y_a - y_b$ каждого i -го маркера определяется по известным координатам y_i маркеров на рейке с учётом вертикального положения рейки y_b , отсчитываемого по шкале 7, относительно плоскости 8. Плоскость задана на высоте y_a лазерным нивелиром или лазерным построителем плоскостей. В каждом положении регистрируется цифровое изображение. Точность такой калибровки в

условиях экспериментальных установок оказывается несколько меньшей, чем точность калибровки камеры, но вполне отвечающей требованиям аэродинамического эксперимента.

Наиболее оперативным способом экспресс-калибровки является автокалибровка. При этом в качестве тест-объекта выступает сам исследуемый объект или его выделенная зона, координаты маркеров (базовых) на которой предварительно измерены и могут считаться взаимно неподвижными. Такую автокалибровку можно производить неоднократно в ходе эксперимента,

периодически или постоянно при каждом отсчёте. Это необходимо, когда в ходе эксперимента может неконтролируемо изменяться взаимное расположение камеры и объекта, и требуется оперативно обновлять значения параметров внешнего ориентирования измерительной системы с привязкой их к системе координат объекта.

Дополнительным достоинством автокалибровки является возможность оперативного самоконтроля текущей погрешности измерений путём сопоставления периодически или в каждом отсчёте заранее известных координат базовых маркеров с текущими результатами их измерений.

Концептуальные схемы измерений. На основе опыта применения метода видеограмметрии в экспериментальной аэродинамике можно сформулировать три концептуальные схемы измерений.

Первая схема (прямая, алгоритмическая). Измеряют координаты $(u; v)$ точек изображения и с использованием рабочей характеристики в прямой форме (1) находят искомые координаты $(x; y; z)$ точек объекта. Для разрешения неопределённости восстановления трёх координат по двум уравнениям в схеме с одной регистрирующей камерой записывают дополнительное уравнение, основанное на заранее известной закономерности исследуемого процесса $z=f(x, y)$ (в обобщённом виде). Подставляя эту априорную зависимость в качестве третьего уравнения в систему (1), находят искомые координаты точек пространства. Данная схема применяется преимущественно в задачах измерения распределённой деформации как поля смещений точек поверхности деформированного объекта от исходного состояния: в большинстве типовых задач, связанных с измерениями распределённых деформаций моделей в потоке аэродинамических труб [1, 9], лопастей воздушных винтов и несущих винтов вертолета [10], элементов натурных конструкций самолетов при испытаниях на земле и в полёте [9, 11].

На поверхность объекта исследований наносят сетку контрастных маркеров, хорошо различимых на цифровых изо-

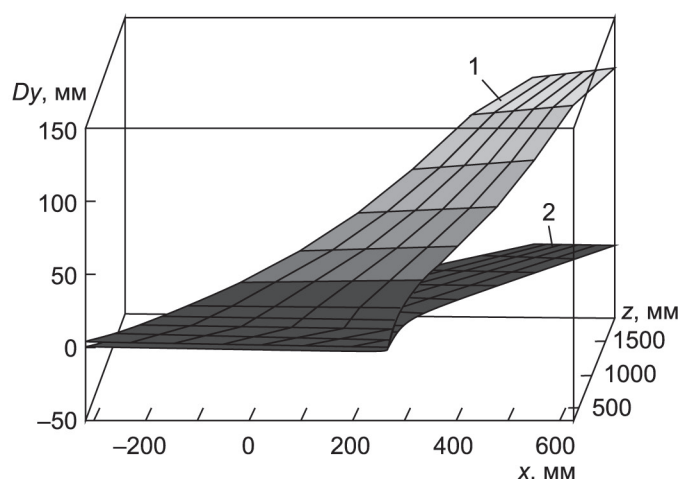
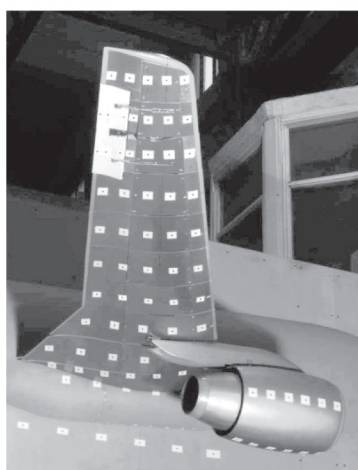


Рис. 2. Цифровое изображение упругой модели крыла с маркерами и трёхмерное представление поля деформации изгиба в потоке аэродинамической трубы:

1, 2 – соответственно исходное и деформированное состояния крыла

бражениях. Обычно маркеры располагаются по сечениям в плоскостях, перпендикулярных координатной оси Oz . Значения координаты z^* сечений измеряют при разметке, и на основании сведений об объекте составляют зависимость $z=f(x, y)$ изменений этой координаты от изменений координат x и y . При измерениях деформации удлиненных объектов, таких как модели крыла самолета или лопасти винта, эта зависимость часто оказывается очень простой, например $z=z^*=const$.

На рис. 2 показаны цифровое изображение модели крыла с маркерами и трёхмерное представление поля деформации изгиба в типовом эксперименте по исследованию характеристик упругоподобной модели крыла в аэродинамической трубе.

Вторая схема (реверсная). Измеряют положения и смещения объекта в пространстве как целого с шестью степенями свободы. Для этого на недеформируемом участке поверхности объекта задают группу базовых маркерных точек с заранее известными трёхмерными координатами $\{x^*; y^*; z^*\}$. Регистрируют изображение этих точек в исходном 1 и текущем 2 состояниях и измеряют координаты точек $\{u_1^*; v_1^*\}$ и $\{u_2^*; v_2^*\}$ соответствующих изображений. Применяют процедуру автокалибровки к каждому полученному массиву данных, находят параметры внешнего ориентирования для исходного $r_{01}=\{x_0; y_0; z_0\}_1, M_1$ и текущего $r_{02}=\{x_0; y_0; z_0\}_2, M_2$ положений объекта. Вычисляют матрицу преобразования координат из первого состояния во второе $M_{21}=M_2/M_1$, затем в предположении неподвижности регистрирующей камеры и недеформируемости базового участка объекта вычисляют трёхмерный вектор $\Delta r=r_{02}-M_{21}r_{01}$ поступательного смещения объекта. Угловые отклонения $\{\alpha; \beta; \gamma\}$ текущего положения объекта от исходного могут быть найдены из матрицы M_{21} решением уравнения (3) методом многомерной минимизации. Примером использования этой схемы являются бесконтактные измерения положения модели летательного аппарата в потоке аэродинамической трубы в режиме сильных динамических возмущений. На рис. 3 показаны цифровое изображение вер-

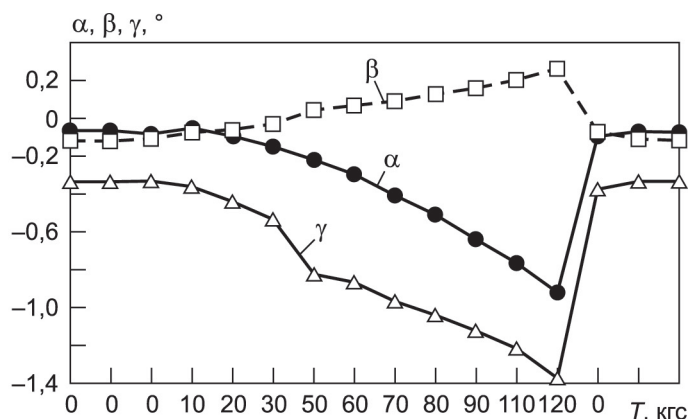
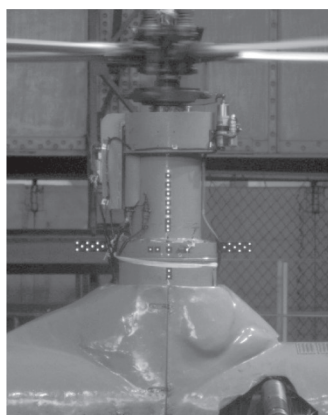


Рис. 3. Цифровое изображение вертолётного прибора с набором базовых маркеров и результаты измерений параметров углового положения прибора в зависимости от тяги T винта при испытаниях в аэродинамической трубе

толётного прибора с набором базовых маркеров и результаты измерений параметров $\{\alpha; \beta; \gamma\}$ углового положения прибора в зависимости от тяги T винта при испытаниях модели несущего винта вертолета в аэродинамической трубе со скоростью потока воздуха 35 м/с. При этом методе измерений сетка маркеров должна быть трёхмерной.

Третья схема. Измеряют геометрические параметры с применением косвенного метода конвергенции изображений. Основой метода конвергенции служит обращенный метод видеограмметрии с использованием априорной информации, полученной из других источников. При этом измерения можно производить также по одному изображению, с помощью одной регистрирующей цифровой камеры. В методе конвергенции предварительно на основе имеющихся теоретических или расчётных представлений о характере исследуемого процесса составляют параметрическую гипотезу движения и деформации объекта. Гипотеза включает формализованную цифровую модель объекта и комплекс параметрических уравнений, описывающих заранее известные закономерности его движения и деформации в пространстве. Значения параметров R гипотезы являются в конвергентном методе измерений искомыми величинами. Формализованная цифровая модель в общем случае представляет собой массив $\{x^*; y^*; z^*\}$ координат точек поверхности объекта в исходном недеформированном состоянии. Это может быть полная трёхмерная

CAD-модель объекта или, в частности, координаты группы маркеров, нанесённых на его поверхность.

При испытаниях регистрируют изображения объекта в исходном и каждом текущем состоянии и измеряют текущие координаты $\{u; v\}$ точек, соответствующих цифровой модели. Численно в цикле варьируют параметры R гипотезы движения. Для каждой комбинации параметров R из исходных значений $\{x^*; y^*; z^*\}$ вычисляют, согласно сформулированной гипотезе, мгновенные значения $\{x'; y'; z'\}$ координат точек цифровой

модели в пространстве. Используя обращённую рабочую характеристику (2), рассчитывают соответствующие мгновенные синтезированные координаты $\{u'; v'\}$ точек изображения. С помощью подходящего метода максимального правдоподобия сопоставляют синтезированные координаты $\{u'; v'\}$ с измеренными текущими координатами $\{u; v\}$ точек изображения и вычисляют обобщённый критерий совпадения (или расхождения). Ту комбинацию параметров R гипотезы движения, при которой наблюдается максимум обобщённого критерия совпадения (или минимум критерия расхождения) принимают за результат измерений $R_{\max}$. При этом рассчитанные мгновенные значения $\{x'; y'; z'\}$ принимают за значения координат точек поверхности объекта в текущем состоянии.

Метод видеограмметрии с конвергенцией изображений применяется для исследования движений объектов со многими степенями свободы, шестью и более. Примерами могут служить исследования штопора самолёта, движения и деформации лопастей несущего винта вертолета, движения объектов, отделяемых от самолёта в потоке воздуха. На рис. 4 приведена последовательность преобразования изображений методом конвергенции при исследовании штопора модели учебно-боевого самолёта-истребителя. Слева направо показаны: исходное теневое изображение модели, полученное в вертикальной аэродинамической трубе (поток воздуха снизу вверх); выделенная и очищенная от посторонних элементов тень модели; заранее



Рис. 4. Последовательность операций в методе видеограмметрии с конвергенцией изображений

заданная трёхмерная математическая модель; синтезированная компьютером тень математической модели в положении в пространстве с заданными шестью параметрами R ; сопоставление исходного и синтезированного теневых изображений с минимизацией расхождения по контуру. Сочетание параметров, при котором наблюдался минимум расхождений по контуру, принимался за результат измерений параметров положения R .

Метрологическое обеспечение описанных методов измерений проводится с применением оборудования Центра коллективного пользования «Высокоточные измерительные технологии в области фотоники» ВНИИОФИ. Накопленный опыт использования метода видеogramметрии в аэродинамическом эксперименте демонстрирует уверенную способность измерений в сложных условиях аэродинамических труб и экспериментальных установок геометрических параметров с погрешностью порядка $1 \cdot 10^{-4}$, приведённой к характерному размеру области измерений (полю зрения камеры). Точность измерений методом конвергенции изображений может оказываться несколько ниже, чем прямого алгоритмического метода с использованием маркеров, из-за того, что параметрическая гипотеза движения и деформации, сформулированная на основе заранее известных данных, может не учитывать всех реально действующих закономерностей или учитывать их не в полной мере.

Литература

1. **В. П. Кулеш, С. Д. Фонов.** Измерение параметров движения и деформации модели самолета в аэродинамической трубе методом видеogramметрии // Ученые записки ЦАГИ. 1998. Т. XXIX. Вып. 1–2. С. 165–176.
2. **A. W. Burner, T. Liu.** Videogrammetric model deformation measurement technique // J. Aircraft. 2001. V. 38. No. 4. P. 745–754.

3. **A. F. Farnood.** Integration of industrial videogrammetry and artificial neural networks for monitoring and modeling the deformation or displacement of structures // Neural Computing & Applications. 2017. V. 28. No.12. P. 3709–3716.

4. **T. Liu, A. W. Burner, T. W. Jones, D. A. Barrows.** Photogrammetric techniques for aerospace applications // Progress in Aerospace Sciences. 2012. V. 54. P. 1–58.

5. **В. М. Сердюков.** Фотограмметрия. М.: Высшая школа, 1983.

6. **Г. Корн, Т. Корн.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984.

7. **D. C. Brown.** Decentering distortion of lenses (PDF) // Photogrammetric Engineering. 1966. 32 (3). May. P. 444–462.

8. **C. S. Fraser.** Photogrammetric camera component calibration – a review of analytical techniques. Workshop on Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision (TU-1), XVII Congress, International Society of Photogrammetry & Remote Sensing, Washington, DC, 1992.

9. **S. Bosnyakov, A. Bykov, V. Coulech, S. Fonov, A. Morozov, V. Moskalik, L. Moskalik, V. Mosharov, A. Orlov, V. Radchenko, N. Tarasov.** Blade Deformation and PSP Measurements on the Large Scale Rotor by Videometric System // ICIASF Records: International Congress in Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, 1997. P. 95–104.

10. **В. П. Кулеш.** Измерения деформации адаптивной носовой части крыла в потоке аэродинамической трубы методом видеogramметрии // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 6. С. 100–109.

11. **В. П. Кулеш.** Измерения деформации крыла пассажирского самолета в полете методом видеogramметрии // Ученые записки ЦАГИ. 2015. Т. XLVI. № 2. С. 54–62.

Дата принятия: 31.08.2018.

Application of videogrammetry in experimental aerodynamics

V. P. Kulesh

Central Aerohydrodynamic Institute n.a. prof. N. E. Zhukovsky (TsAGI),
Zhukovsky, Moscow region, Russia, e-mail: mera@tsagi.ru

The specific features of videogrammetry method applications to the measurements of distributed geometric parameters of position, movement and deformation in experimental aerodynamic are briefly presented. On the basis of experiment conditions the preference is given to the schemes with just one digital camera using. The features of the image distortions correction and the measurement system calibration are noted. Three conceptual schemes of measurements are formulated.

Key words: experimental aerodynamics, videogrammetry, non-contact measurements, position parameters, motion parameters, deformation parameters, scheme of measurements.