

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ИСПЫТАНИЯХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Гришанов А.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Причины расширения сферы применения систем технического зрения (СТЗ), как средств получения и передачи информации об объекте производства, заключаются в их универсальности (допускается широкий спектр анализируемых характеристик), многофункциональности (допускается выполнение задач различной степени сложности — от логических до интеллектуальных), лучшей форме представления информации для обработки на ЭВМ (допускается предварительное квантование и дискретизация изображений), высоком уровне гибкости (допускается оперативная переналадка функций измерения путем программного изменения разрешающей способности сенсорного приемника, а также путем изменения условий приема — ракурса, расстояния до объекта и др.). С помощью СТЗ возможно измерение таких физических и геометрических параметров объекта производства, как текстура, пористость, шероховатость, соосность, плоскостность, линейные размеры, ориентация, диаметры и площади отверстий и т.д. Другой задачей СТЗ является контроль параметров взаимного функционирования исполнительных устройств и объекта производства. СТЗ могут использоваться и в качестве инструмента диагностики ракетных двигателей на жидком топливе, т.к. в случае износа двигателя в факельной струе появляются нехарактерные компоненты, которые могут быть идентифицированы спектроскопическими методами [1].

Современный уровень развития производства летательных аппаратов делает эту отрасль промышленности одним из основных потребителей методик и средств CAD/CAM/CAE систем, которые позволяют осуществить сквозное проектирование и информационную поддержку изделия в течение всего его жизненного цикла [2]. Однако они имеют низкий уровень автоматизации измерений геометрических параметров продукции и анализа измеренных данных. Главным недостатком традиционного метода контроля, предусматривающего использование различных измерительных инструментов (шаблонов, калибров и т.п.), является длительность цикла проектирования и изготовления инструмента. Применение в системах контроля современных универсальных координатно-измерительных машин (КИМ) невозможно при измерении параметров крупногабаритных изделий.

Дистанционные бесконтактные методы измерений угловых перемещений с объективной регистрацией с помощью СТЗ, состоящих из приемника излучения, блоков ввода, ПЭВМ позволяют устранить недостатки, присущие традиционным средствам измерения, так как при соответствующей

шей оптике контролируются параметры изделий любых размеров (в том числе и крупногабаритных).

Целесообразно применение СТЗ для контроля параметров напыляемого материала при газотермическом напылении покрытий на детали двигателей ЛА, т.к. температура в плазменном сгустке достигает 4000...5000 К, что делает невозможным применение контактных методов измерения [3]. При использовании спекл-интерферометрического метода для виброиспытаний узлов двигателей ЛА в состав испытательного стенда также включается СТЗ, необходимая для регистрации изображений объекта измерений с целью их дальнейшей обработки [4]. Необходимо использование СТЗ и при термовакуумных испытаниях для измерения деформаций и угловых перемещений изделия.

Основным элементом СТЗ является сенсорный приемник. При регистрации световых полей предпочтение отдается матричным твердотельным фотоприемникам, жесткий и стабильный растр которых выгодно отличает их от электронно-лучевых приборов с электрической либо магнитной разверткой электронного пучка. Если для решения задачи контроля требуется ввод изображений с стандартной кадровой частотой, то в качестве датчика можно использовать телекамеру Megaplus Camera, Model ES 1,0 8-bit Version, которая обладает следующими характеристиками: формат разложения изображения 1008 × 1018 пикселей; отношение сигнал/шум > 48 дБ; время накопления 1/30...1/8000 с; спектральный диапазон 400...1000 нм. Использование в качестве датчиков цифровых фотоаппаратов ведет к уменьшению скорости измерения, зато дает выигрыш в точности за счет большего числа элементов разложения изображения. Подобные сенсорные приемники используются и для измерения распределений температур, например, в тепловизоре ТАНДЕМ VS54, который имеет следующие характеристики: диапазон температур 700...1700°C и выше; температурное разрешение 1...2°C; инструментальная погрешность измерений не более 20°C; количество рабочих элементов ПЗС-матрицы: 741 × 576.

Для ввода изображения с матричного фотоприемника в память ЭВМ разработаны устройства сопряжения, в том числе, и высокого быстродействия. Например, устройства сопряжения MotionScope ® Black & White Series (черно-белые) или MotionScope ® Colour Series (цветные) фирмы "Redlake motionscope" имеют следующие характеристики: скорость ввода 1000, 2000, 8000 кадров в секунду (в зависимости от модели); разрядность АЦП - 8 бит при работе с ПЗС-матрицами с пространственным разрешением 480 × 420 пиксел.

При включении в состав системы автоколлиматора появляется возможность использования СТЗ при сборке и юстировке крупногабаритных изделий, совмещение с которыми оптических контрольных элементов специальной формы позволяет измерять все три угла поворота изделия по одному изображению светового пучка, отраженного от контрольного элемен-

та [5].

Оптический контрольный элемент, представляющий собой трехгранную призму, одна из отражающих граней которой выполнена в виде фрагмента круговой конической поверхности (рис.1), позволяет осуществлять угловые измерения на переменных дистанциях. Коническая поверхность ориентирована таким образом, что перпендикуляр к ее образующей составляет малый угол β с ребром прямого двугранного угла в его биссекторной плоскости. При отражении луча от данного оптического элемента в фокальной плоскости автоколлиматора получается изображение, состоящее из дуг эллипсов (рис.2).

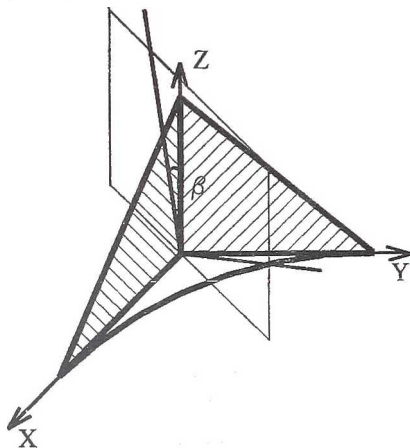


Рис. 1. Контрольный элемент с конической отражающей поверхностью

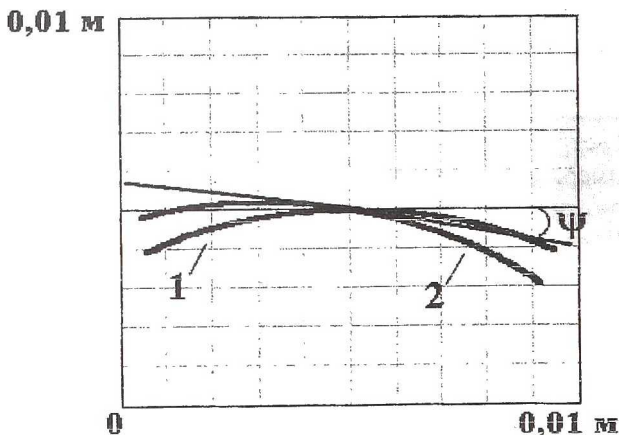


Рис. 2. Положение одной из дуг до поворота и после поворота:
1 – дуга до поворота; 2 – дуга после поворота

При угловом перемещении оптического элемента изменяется угол наклона этих дуг и длина полуосей. По этим изменениям и судят об углах поворота изделия. Сложная форма фигур, по которым определяется угловое перемещение объекта и вызывает необходимость применения в ОЭС матричного фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости автоколлиматора. На рис. 2 показано положение и форма одной из дуг до и после поворота.

Математическое моделирование дало возможность связать между собой конструктивные параметры ОЭС и оценить погрешности метода.

Воспользовавшись приведенными в [5] выражениями для дуг эллипсов, видимых на изображении, можно предложить методику расчета угла β , характеризующего контрольный элемент с конической гранью:

$$\begin{cases} x(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{3}} f\beta \sin \alpha \\ y(\alpha) = 2 f\beta (1 - \cos \alpha) \end{cases} \quad \alpha \in \left[-\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4} \right], \quad (1)$$

$$\begin{cases} x(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{3}} f\beta (\sin \alpha - 1) \\ y(\alpha) = -2 f\beta \cos \alpha \end{cases} \quad \alpha \in \left[\frac{\pi}{4}; \frac{3 \cdot \pi}{4} \right], \quad (2)$$

где f - фокусное расстояние объектива; α - двугранный угол между плоскостью, проходящей через образующую конуса, ось конуса и нормаль к конической поверхности, и бисекторной плоскостью прямого двугранного угла; $x(\alpha)$, $y(\alpha)$ - координаты точек на изображении. Выражение (1) представляет собой формулу дуги эллипса, получающейся на фотоприемнике вследствие отражения луча сначала от двух прямых граней и затем от конической, а (2) - вследствие отражения луча сначала от прямой грани, затем от конической, затем от другой прямой грани.

Крайние точки дуги (1) будут иметь следующие координаты:

$$\begin{cases} x_n \approx -0,816 f\beta; y_n \approx 0,586 f\beta \\ x_k \approx 0,816 f\beta; y_k \approx 0,586 f\beta \end{cases} \quad (3)$$

Для дуги (2) аналогично

$$\begin{cases} x_n \approx -0,338 f\beta; y_n \approx -1,414 f\beta \\ x_k \approx -0,338 f\beta; y_k \approx 1,414 f\beta \end{cases} \quad (4)$$

Из (3) и (4) видно, что наиболее вытянута будет дуга (2) по оси y , и расстояние между крайними точками этой дуги по оси y будет

$$y_k - y_n \approx 2,828 f\beta \quad (5)$$

Для уменьшения погрешности измерения углов поворота необходимо, чтобы крайние точки дуги находились в поле зрения фотоприемника на его краях. Поэтому, используя (5), имеем

$$2,828 f\beta \approx D, \quad (6)$$

где D - линейный размер фотоприемника.

Таким образом,

$$\beta \approx \frac{D}{2,828 f}. \quad (7)$$

При $f = 1$ м и $D = 0,01$ м из (7) получаем $\beta \approx 3,536 \cdot 10^{-3}$ рад.

Углы поворота изделия относительно осей $Ox - \theta_x$, $Oy - \theta_y$ и угол скручивания θ_c с параметрами световых фигур в поле зрения автоколлиматора связаны следующими выражениями:

$$\Theta_x = \frac{\lambda - 1}{\sqrt{2}}, \quad \Theta_y = \frac{\lambda(\varphi - \psi)}{\sqrt{2}}, \quad \Theta_z = \psi,$$

где λ - отношение длин малых полуосей эллипсов до и после поворота; φ - угол поворота касательной к дуге малого эллипса, ψ - угол поворота касательной к дуге большого эллипса. Поскольку $\theta_c = \psi$, то погрешность измерения угла скручивания оценивается наиболее просто.

Для оценки погрешности измерения угла скручивания необходимо определить погрешность измерения угла между касательной к дуге эллипса и осью X . Уравнение данной касательной запишем в виде

$$y = kx + b.$$

В этом уравнении k будет являться тангенсом искомого угла.

Пусть прямая проходит через две точки: (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Тогда

$$y_1 = kx_1 + b; \quad y_2 = kx_2 + b.$$

Отсюда

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1},$$

$$\frac{\Delta k}{k} = \Delta(\ln k) = \frac{2\Delta y}{y_2 - y_1} + \frac{2\Delta x}{x_2 - x_1}.$$

Т.к. значение погрешности, с которой можно измерить координаты точки по осям X и Y , одинаково в случае фоточувствительного элемента квадратной формы, то $\Delta x = \Delta y$. Минимальный размер погрешности будет, если взять точки на прямой, находящиеся на максимальном расстоянии друг от друга, т.е. $y_2 = x_2 = x_{\max}$ и $x_1 = y_1 = 0$. Тогда имеем

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{4\Delta x}{x_{\max}}. \quad (8)$$

Т.к. $k = \operatorname{tg} \psi$, $\psi = \operatorname{arctg} k$, где ψ - угол между искомой прямой и осью X, то

$$\Delta \psi = \frac{1}{1+k^2} \Delta k. \quad (9)$$

Поскольку угловое положение оси X также известно с погрешностью $\Delta \psi$, то значение погрешности в формуле (9) необходимо удвоить, т.е.:

$$\Delta \psi = 2 \frac{k}{1+k^2} \frac{\Delta k}{k}. \quad (10)$$

Функция $2 \frac{k}{1+k^2}$ на отрезке $k \in [0; \infty]$ имеет максимум, равный 1, поэтому из (10) с учетом (8) следует

$$\Delta \theta_c = \Delta \psi \leq \frac{4 \Delta x}{x_{\max}}$$

Показано, что для многоградационных матричных фотоприемников погрешности измерения линейных перемещений фрагментов изображения могут быть уменьшены до десятых долей размера одного фоточувствительного элемента [6], т.е. $\Delta x = 0,1$. При размере фотоприемной матрицы 1000×1000 элементов $x_{\max} = 1000$. Тогда погрешность измерения угла θ_c составит 0,0004 рад.

Список литературы

1. Андреев Е.П., Дубровин А.М. Спектроскопия факела как инструмент диагностики ракетных двигателей// Оптический журнал, 2002. - Т.69.- №1, с.30-33.
2. Минаевич С.Ф., Дурягин А.В. Сквозное проектирование и контроль сложных деталей ГТД. /Тез. докл. Всероссийской научно-техн. Конф. «Аэрокосмическая техника и высокие технологии - 2002». – Пермь, 2002. – с.180.
3. Гришанов А.В., Гришанов В.Н., Мордасов В.И. и др. Использование телевизионно-вычислительных комплексов для контроля параметров плазмотронов плазменно-дугового напыления. - Тез докл. Всерос. научно-техн. конф. "Аэрокосмическая техника и высокие технологии - 2001". - Пермь: ПГТУ, 2001. - С. 85.
4. Гришанов А.В., Попов К.Н. Стенд виброакустических испытаний узлов летательных аппаратов на базе электронного спекл-интерферометра. - Тез. докл. Междунар. молодеж. науч. конф. "XXVI Гагаринские чтения". - М.: И-во "ЛАТМЭС", 2000. Том 2 - С.182-183.
5. Батян П.В., Коняхин И.А., Панков Э.Д. Контрольные элементы автоколлимационных угломеров с улучшенными метрологическими характеристиками. – Оптический журнал, Т. 64, № 1, 1997. - с.61-66.
6. Гришанов А.В., Гришанов В.Н., Мордасов В.И. Измерительные системы с многоэлементными фотоприемниками в технологии машиностроения.//Перспективные материалы. 2000. N 2. -С.97-103.