



УДК 681.3, 004.932

А.Ю. Поройков

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

## **МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ВИДЕОКАМЕР ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ 3D ДЕФОРМАЦИЙ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ФОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*В работе представлен обзор теоретических основ проведения калибровки в оптических исследованиях с использованием стереосистем. Рассмотрен практический подход к реализации автоматизированной процедуры калибровки двух цифровых видеокамер в экспериментах метода корреляции фоновых изображений.*

**КАЛИБРОВКА, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХАФА, МЕТОД КОРРЕЛЯЦИИ ФОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время существует большое количество оптических методов визуализации и диагностики деформаций: поляризационно-оптический метод, интерферометрические методы и другие. Одним из современных методов является метод корреляции фоновых изображений (МКФИ). Данный метод основан на современных алгоритмах цифровой обработки изображений и позволяет проводить исследования по визуализации и диагностики деформаций в натуральных экспериментах.

Для визуализации 3D деформаций с применением метода корреляции фоновых изображений используют стереосистемы, состоящие из двух цифровых видеокамер, или системы из большего количества камер. Проведение таких исследований требует предварительной процедуры калибровки, которая позволяет в дальнейшем сопоставить изображения, полученные различными камерами.

### **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Метод корреляции фоновых изображений (в англоязычной литературе IPCT – Image Pattern Correlation Technique) - высокоточный оптический метод, предназначенный для визуализации и диагностики деформации поверхности исследуемого объекта [1].

Для определения деформации объекта на исследуемые участки поверхности наносится специальное изображение – фоновый экран. Фоновый экран представляет собой специальное структурированное изображение, зачастую состоящее из точек, расположенных на нем с заданными параметрами распределения. Для каждого конкретного случая фоновый экран подбирается согласно параметрам экспериментальной установки: расстоянием до исследуемого объекта, требуемым размером поля зрения, амплитудой деформаций и т.п.

С помощью цифровой камеры получают снимки фонового экрана до и после деформации. Обработка полученных изображений с помощью кросскорреляционных алгоритмов позволяет визуализировать деформации поверхности исследуемого объекта помощью векторного поля определенных смещений или с помощью поля коэффициента

корреляции. Преимуществами метода корреляции фоновых изображений является простота создания экспериментальной установки, для чего необходима лишь видеокамера и нанесенный на исследуемый объект фоновый экран, и возможность проведения натуральных испытаний.

Исследования с применением МКФИ проводят как с использованием одной единственной цифровой камеры, так и с использованием нескольких. В отдельных случаях, когда хорошо известны геометрические параметры экспериментальной установки, а также характер деформации ограничен конструктивными особенностями исследуемого объекта, возможна визуализация и получение информации о деформации в 3D при использовании одной камеры. Однако в большинстве случаев такой подход может получить информацию только о двумерной деформации (смещениях, угле поворота пластины [2]). Поэтому в общем случае в экспериментах для получения 3D визуализации деформации необходимо использование стереосистем, состоящих из двух или более цифровых камер.

Применение более одной камеры в эксперименте делает обязательным проведение процедуры калибровки, которая позволяет в дальнейшем сопоставить изображения, полученные различными камерами.

Процедура калибровки камеры заключается в связывании координат в пространстве изображений с реальными координатами в мировом пространстве. Для этого необходимо определить расположение самой камеры в координатах мирового пространства и ее внутренние параметры. С математической точки зрения процедура калибровки сводится к определению калибровочной матрицы, которая содержит как внутренние, так и внешние параметры в неявном виде.

Модели, используемые для связи мировых координат с координатами на изображении можно свести к двум видам. Первый вид – полиномиальные модели, которые не рассматривают физические параметры камеры и приемной системы, а чисто формально задают связь между координатами на изображении с координатами в пространстве предметов с помощью полинома с заданной степенью точности. Второй вид – модели, задаваемые физическими параметрами камеры и оптической системы.

Для процедуры калибровки камер существуют несколько подходов. Первый заключается в прямом измерении координат расположения камеры и внутренних параметров, таких как размер одного пикселя, фокусное расстояние объектива и других. И в последующем составлении калибровочной матрицы. Однако такой подход слишком сложен на практике и обладает высокой погрешностью, особенно в исследованиях на натуральных объектах.

Второй подход, более прост в применении и заключается в расчете внутренних параметров камеры и ее расположении относительно мировых пространственных координат на основе сделанных ее изображений. Изображения могут содержать, как и обыкновенные объекты (самокалибровка), так и специальные тестовые мишени и объекты. Использование последнего способа с объектами с известными геометрическими размерами позволяет повысить точность калибровки и уменьшить время обработки изображений. Так как при использовании самокалибровки необходимо найти соответствующие точки на двух изображениях, что является сложной задачей не только с точки зрения сложности вычислений, но и с точки зрения однозначности ее решения.

Для проведения калибровки камеры была выбрана модель камеры, включающая в себя 11 параметров [3]

$$\begin{bmatrix} s^1 P_r \\ s^1 P_c \\ s \end{bmatrix} = {}^w \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} {}^w P_x \\ {}^w P_y \\ {}^w P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^w P_x \\ {}^w P_y \\ {}^w P_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  ${}^1P_r, {}^1P_c$  – координаты точки на изображении,  ${}^1C$  – матрица камеры, преобразующая координаты мирового пространства в координаты на изображении,  ${}^wP_x, {}^wP_y, {}^wP_z$  – координаты точки в мировых координатах,  $c_{11} \dots c_{33}$  – элементы матрицы камеры. Матрица  ${}^1C$  содержит в себе в неявном виде другие матрицы, которые содержат в себе физические параметры камеры и оптической системы

$${}^1P = {}^1C \cdot {}^wP = \left( {}^1S \cdot {}^F\Pi(f) \cdot {}^cTR(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) \right) {}^wP, \quad (2)$$

где  ${}^1P$  – координаты точки на изображении,  ${}^1S$  – матрица преобразования вещественных координат в пиксельные координаты,  ${}^F\Pi(f)$  – матрица перспективного преобразования,  ${}^cTR(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$  – матрица учитывающая поворот и перенос,  ${}^wP$  – координаты точки в мировых координатах.

Таким образом, согласно (1), процедура калибровки сводится к нахождению 11 неизвестных параметров матрицы камеры. Для этого необходимо определить на изображении минимум 6 точек, у которых будут точно известны координаты в мировом пространстве. После этого можно получить систему, состоящую из 12 уравнений, решение которой позволит определить 11 искомым параметров.

На практике использование только 6 точек при калибровке приводит к понижению точности этой процедуры. Поэтому необходимо увеличение количества точек с известными координатами. В свою очередь повышение количества точек усложняет проведение калибровки вручную и требует автоматизации этого процесса.

В качестве тестовых объектов часто используют несколько ортогональных плоскостей, на которые нанесен определенный рисунок. Рисунок может представлять собой шахматную доску, набор пересекающихся линий или рисунок содержащий другие геометрические объекты. Таким образом, в задачу автоматизации процедуры калибровки входит нахождение этих объектов на рисунке. Координаты найденных объектов сопоставляются с известными координатами этого объекта в мировой системе, что позволяет составить уравнение для нахождения искомой матрицы камеры. Используя калибровочный объект с большим количеством таких объектов можно составить систему из большого количества уравнений, решение которой позволит повысить точность калибровочной процедуры.

Преобразование Хафа — метод по определению положения различных геометрических объектов на изображении [4]. Процедура преобразования начинается с создания, так называемого, накопительного массива определенной размерности. Размерность массива определяется количеством параметров у искомого геометрического объекта. Если ведется поиск прямой на изображении, а она на плоскости задается линейным уравнением

$$y = k \cdot x + b, \quad (3)$$

то соответственно она имеет только два параметра:  $k$  и  $b$ . В этом случае размерность массива будет равна 2. Если производится поиск круга, то размерность будет равняться 3 и т.д. В таком случае, каждому объекту на изображении будет соответствовать одна своя точка в пространстве Хафа.

Далее преобразование сводится к перебору ненулевых точек изображения и расчета для каждой из них всех возможных прямых проходящих через нее. Если параметры прямой входят в заданный при создании накопительного массива диапазон допустимых значений, то производится увеличения значения массива по координатам, соответствующим этим параметрам.

В результате преобразования в каждом элементе накопительного массива сохраняется количество точек, которые могут принадлежать объекту с параметрами, соответствующими

координатам этого элемента. Таким образом, проведя поиск локальных максимумов в пространстве Хафа, по найденным координатам можно построить искомые геометрические объекты.

В ходе данной работы было создано программное обеспечение, позволяющее проводить предварительную пространственную фильтрацию изображений, дальнейшее преобразование Хафа с нахождением локальных максимумов, отображении накопительного массива в графическом виде, отображении определенных прямых на исходном изображении, и вычислении точек их пересечения для дальнейшего использования их координат в процедуре калибровки камер. Программное обеспечение было разработано на языке C# [5].

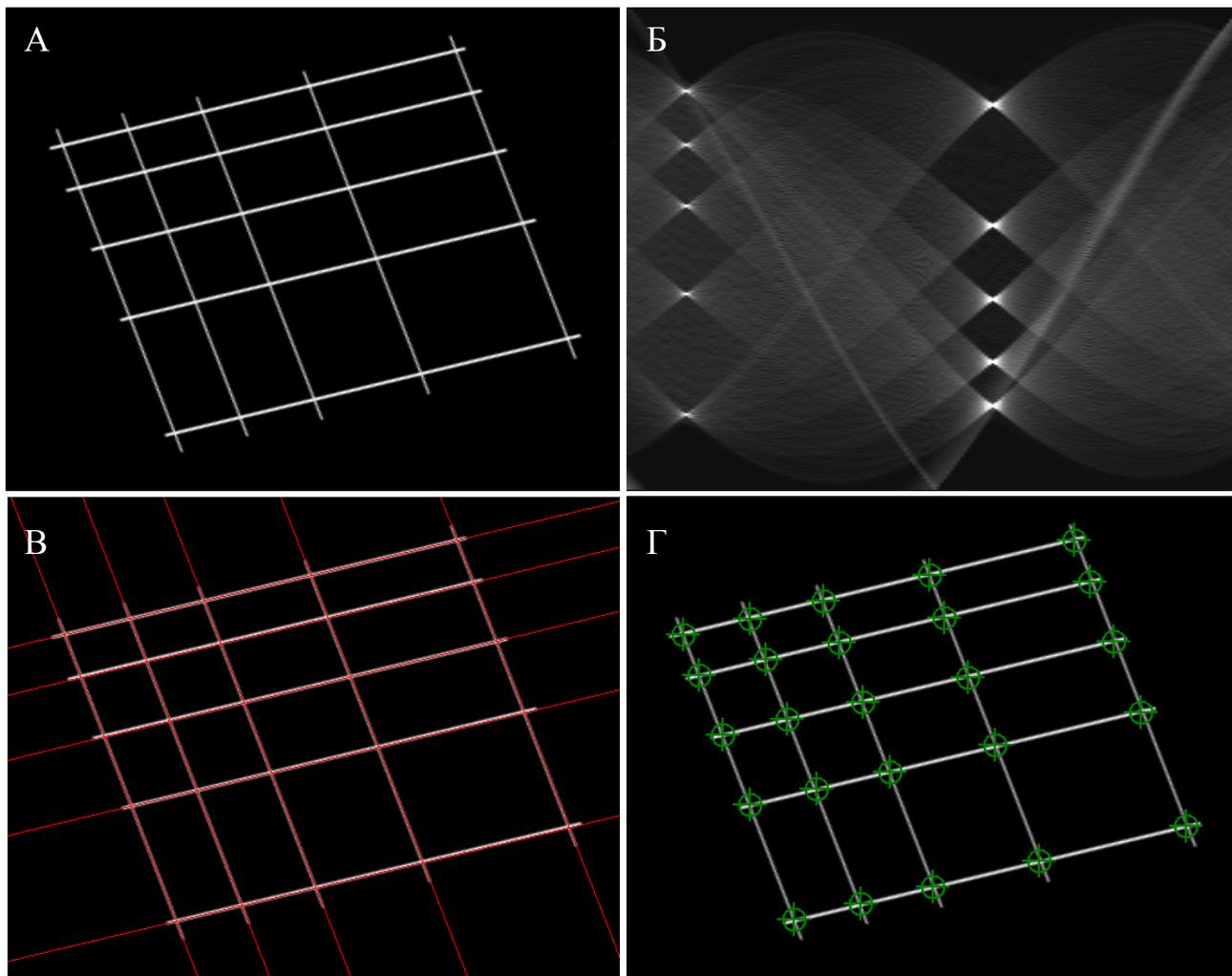


Рис. 1. Пример работы программного обеспечения на синтезированном изображении (А – исходное изображение, Б – графическое представление пространства Хафа, В – найденные прямые, Д – найденные точки пересечения)

При практической реализации алгоритма преобразования Хафа для калибровки камер может возникнуть проблема обнаружения горизонтальных линий. Для ее решения формулу (3) можно представить в полярных координатах, что позволит исключить эту неопределенность и преобразует (3) в следующую формулу

$$y = \left( -\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right) \cdot x + \left( \frac{r}{\sin \theta} \right), \quad (4)$$

где  $r$  – расстояние до прямой от начала координат,  $\theta$  – угол наклона прямой.

На рис. 1Б видно, что графическое представление исходного изображения в пространстве Хафа представляет собой набор синусоид. Координаты точек, где они пересекаются, соответствуют отрезкам прямых на исходном изображении.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе данной работы был представлен обзор теоретических основ проведения калибровки в оптических исследованиях с использованием стереосистем, рассмотрен один из способов проведения автоматизированной процедуры калибровки цифровых видеокамер. В разработанном программном обеспечении реализован алгоритм нахождения координат пересечения отрезков прямых на изображении с помощью преобразования Хафа. Алгоритм показал свою работоспособность на синтезированных тестовых изображениях.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № 02.740.11.0449) и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.2.2.2/10404).

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Kirmse T., Wagner A.** Advanced Methods for In-flight Flap Gap and Wing Deformation Measurements in the Project AWIATOR. Proc. of First CEAS European Air and Space Conference, Berlin (Germany), 10. – 13. 09. 2007
2. **Поройков А.Ю.** Обработка картин метода корреляции фоновых изображений // Оптические методы исследования потоков: Труды X Межд. науч-технич. конференции. М.: Изд-во МЭИ, 2009. С. 542 – 545
3. **Шапиро З.Л., Стокман Дж.** Компьютерное зрение. М., из-во: Бином. Лаборатория знаний, 2009 г. 760 с.
4. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2005, 1072 с.
5. **Шилдт Г. С#:** Учебный курс. С-Пб.: Питер; К.: Издательская группа BHV, 2003. 512 с.

A.Yu. Poroykov

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

## **TECHNIQUE FOR CALIBRATING CAMERAS FOR 3D VISUALIZATION OF DEFORMATION WITH IMAGE PATTERN CORRELATION TECHNIQUE**

*The paper provides an overview of the theoretical base of calibration in the optical research using stereo systems. A practical approach for implementing automated calibration for two digital video cameras in the experiments of image pattern correlation technique is considered.*

CALIBRATION, HOUGH TRANSFORM, IMAGE PATTERN CORRELATION TECHNIQUE