535.31:004.94

Анализ метода корреляции фоновых изображений для измерения изгиба металлической поверхности

А. Ю. ПОРОЙКОВ, Н. М. СКОРНЯКОВА

Московский энергетический институт (технический университет), Москва, Россия, e-mail: skorniakovaNM@mpei.ru

Дан анализ метода корреляции фоновых изображений поверхности при ее изгибе. Разработан алгоритм математического моделирования картин корреляции. Рассмотрено влияние параметров кросскорреляционной обработки на погрешность определения изгиба металлической пластины и угла ее наклона.

Ключевые слова: *метод корреляции фоновых изображений, математическое моделирование, кросскорреляционная обработка.*

The analysis of image pattern correlation technique for bending surface is carried out. The algorithm of modeling pictures of image pattern correlation technique is developed. The analysis of cross correlation processing parameters influence on error of metal surface bending measurements results is carried out.

Key words: *image pattern correlation technique, mathematic modeling, cross correlation processing.*

Существующие методы диагностики изгиба металлической поверхности [1] как оптические, так и иные, не позволяют в полной мере исследовать изгиб крупномасштабной поверхности на натурных моделях. Часть из них — точечные методы, которые не дают общей картины изгиба поверхности, а другая часть, позволяющая получить поле изгиба, требует использования сложных оптических систем и приборов, а также изготовления масштабных копий объектов из специальных оптических материалов.

С исследованием изгиба поверхности в натурных экспериментах связаны многие области техники [2]. Поэтому разработка метода измерения изгиба различных поверхностей актуальна.

Метод корреляции фоновых изображений (МКФИ). Этот оптический метод диагностики деформации (изгибов, положения и перемещения) основан на применении цифровых фото- и видеокамер и компьютерной обработке оптических изображений поверхности с помощью кросскорреляционных алгоритмов [3].

Алгоритм метода включает следующие этапы последовательных действий.

1. Нанесение фонового экрана на исследуемую поверхность. Он представляет собой специальный рисунок, изображение которого регистрируется цифровыми видеокамерами. На практике чаще всего на белый фон наносят черные точки, расположенные по различным функциям распределения случайных величин. Параметрами фоновых экранов служат вид функции распределения случайных величин, ее параметры, размеры точек и их цвет [4]. От этих параметров зависит погрешность определения изгиба, получаемая при кросскорреляционной обработке картин МКФИ. Иногда фоновым экраном может служить сама текстура поверхности объекта.

2. Регистрация изображений фонового экрана в исходном состоянии исследуемой поверхности. Полученное изображение будет опорным для цифровой видеокамеры при расчете корреляционной функции.

3. Регистрация изображения фонового экрана при изгибе поверхности. Полученные изображения будут содержать информацию об изгибе и являться измерительными при расчете кросскорреляционной функции.

4. Кросскорреляционная обработка полученных изображений. Каждое измерительное изображение, соответствующее определенному моменту изгиба поверхности, разбивается на соответствующие участки. Размер участков и шаг разбиения задается параметрами обработки. Для полученных участков корреляционная функция рассчитывается по формуле

$$f(x, y) \circ g(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{N} f^*(m, n) g(x+m, y+n), \qquad (1)$$

где $\circ$ — оператор корреляции; $f(x, y)$, $g(x, y)$ — двухмерные функции распределения яркости на выбранных участках опорного и измерительного изображений; M, N — размеры участков изображений по вертикали и горизонтали; * — оператор комплексного сопряжения.

5. Поиск максимума полученной функции. Координаты его и определяют смещение изображения на выбранном участке, которое можно рассматривать как смещение точек на получаемых изображениях фонового экрана. Смещения для всех участков одного измерительного изображения при дальнейшей обработке согласно выработанной математической модели позволяют измерить изгиб всей поверхности.

На точность метода влияют такие из основных параметров обработки, как размер окна опроса и область перекрытия. От первого зависит размер участков изображений, по которым рассчитывается функция корреляции, а второй определяет периодичность разбиения на данные участки. Оптимальный подбор размера окна опроса связан со многими факторами: амплитудой деформаций, параметрами фонового экрана, фото- или видеокамеры и т. д.

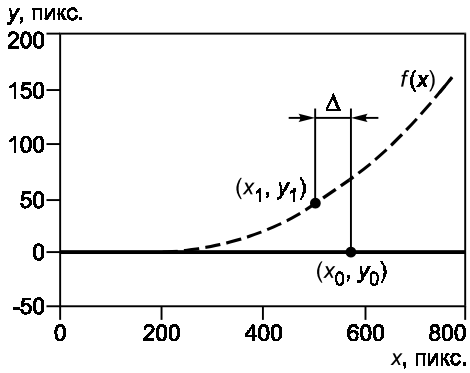

Рис. 1. Схема смещения точки при деформации поверхности

При выборе слишком большого окна опроса может произойти ситуация, когда характерный размер изгиба меньше размера окна опроса, таким образом, в одном окне опроса точки фонового экрана на получаемых изображениях будут смещаться в разные стороны, и кросскорреляционная обработка даст ошибочный результат. Если точки будут смещаться в одном и том же направлении, но на разные расстояния, то из-за статистического характера корреляции произойдет усреднение общего вектора смещения на данном участке изображения. С другой стороны, выбор слишком малого размера окна опроса при больших смещениях, когда большое количество точек выйдет за пределы окна опроса, также приводит к большой погрешности.

Таким образом, для уменьшения погрешности обработки изображений требуется использовать возможно меньшее окно опроса, чтобы получить наиболее точное значение смещения в каждой пространственной точке изображения. Однако на практике размер окна при обработке необходимо увеличивать для исключения ошибочных результатов. Поэтому для каждого конкретного случая требуется определить оптимальный размер окна опроса.

Постановка задачи и алгоритм численного расчета. Параметры кросскорреляционной обработки картин МКФИ — лишь один из факторов, влияющих на точность метода. В данной работе поставлена задача оценки именно этой составляющей, так как только она полностью контролируется при проведении натурных экспериментов. Проведем математическое моделирование изображений фонового экрана при различных видах изгиба поверхности.

Рассмотрим изменение изображений фонового экрана при изгибе пластины, на которую он нанесен. Изменение изображений заключается в смещении точек относительно первоначального положения.

Проследим за перемещением одной точки при изгибе поверхности, закрепленной с одной стороны (рис. 1). Первоначально точка находилась на недеформированной поверхности, обозначенной на рисунке горизонтальной линией, с пространственными координатами (x_0, y_0). После деформации поверхности по некоторому закону $y = f(x)$ (изгибаемая поверхность показана пунктирной линией) точка переместилась, ее новые пространственные координаты (x_1, y_1). Из рис. 1 следует, что в зависимости от расположения регистрирующей камеры смещение одной и той же точки будет различным. Если камера будет располагаться сверху, перпендикулярно исследуемой поверхности, то смещение Δ будет зарегистрировано только в горизонтальной плоскости. Длина профиля поверхности до рассматриваемой точки составляет $l_0 = x_0$.

При деформации поверхности координата точки относительно самой поверхности не изменилась, но изменилась координата точки относительно пространственных координат. Для расчета положения точки в пространственных координатах необходимо вычислить длину кривой, которую образовал после деформации профиль поверхности исследуемого объекта, по формуле

$$l = \int_a^b \sqrt{1 + (f'(x))^2}\, dx, \qquad (2)$$

где l — длина кривой; a, b — начальная и конечная пространственные координаты кривой, в рассматриваемом случае $a = 0$, $b = x_1$; $f'(x)$ — производная функции, определяющей деформацию поверхности исследуемого объекта.

Длина кривой, рассчитанная по (2), будет соответствовать длине поверхности от ее начала до рассматриваемой точки перед деформацией, т. е. $l = l_0$. Таким образом, форму-

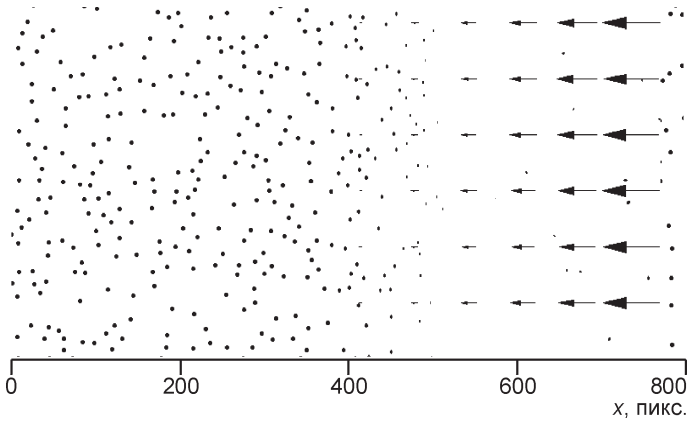

Рис. 2. Результаты кросскорреляционной обработки смоделированной картины МКФИ

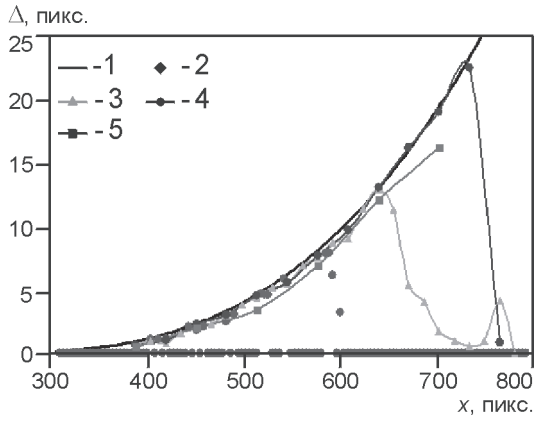

Рис. 3. Результаты обработки смоделированных картин МКФИ при меньших размерах окна опроса:

1 — теоретическая зависимость; *2* — 16×16 пикс.; *3* — 32×32 пикс.; *4* — 64×64 пикс.; *5* — 128×128 пикс.

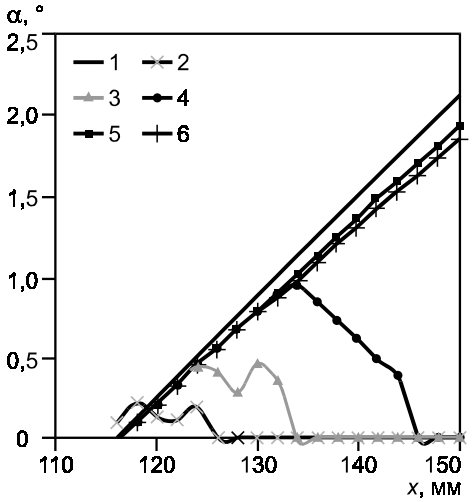

Рис. 4. Результаты обработки экспериментальных картин МКФИ при больших размерах окна опроса:

1 — теоретическая зависимость; *2* — 64×64 пикс.; *3* — 128×128 пикс.; *4* — 256×256 пикс.; *5* — 512×512 пикс.; *6* — 1024×1024 пикс.

ла (2) связывает начальную координату точки x_0 и координату точки после деформации x_1. Моделирование картин МКФИ состоит в изменении некоторым образом ранее созданного фонового экрана, причем изменение должно соответствовать выбранному типу деформации.

Алгоритм численного расчета состоит из последовательности шагов:

создание фонового экрана;

выбор функции, соответствующей изгибу поверхности, определяющей смещение участков измерительного смоделированного изображения относительно опорного изображения;

выбор соответствующей сетки дискретизации расчетной области и численного расчета по (2) для каждого узла сетки. Таким образом, будут определены новые координаты узлов, соответствующие координатам узлов до изгиба;

перенос участков изображения в новые координаты.

Моделирование картин МКФИ. В качестве объекта для моделирования рассмотрим гибкую пластину, один край которой жестко закреплен, а второй подвергается деформации. Такой случай можно часто встретить на практике, например, при исследовании деформации крыла самолета [3].

Функция, соответствующая изгибу поверхности, имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \le 200; \\ \left(\dfrac{x - 200}{45}\right)^2, & 200 \le x \le 771. \end{cases} \qquad (3)$$

Ее график представлен на рис. 1.

По описанному выше алгоритму проведем моделирование картин МКФИ. Результаты корреляционной обработки представлены на рис. 2. Стрелками показаны смещения участков поверхности.

Изменив параметры компьютерной обработки, построим зависимости погрешности результатов обработки от размеров окон опроса. На рис. 3 приведены значения смещений Δ, определенные в ходе обработки смоделированных изображений, при различных параметрах обработки и рассчитанная с помощью численного интегрирования теоретическая зависимость.

Согласно рис. 3 экспериментально смещения на смоделированных изображениях определяются, только начиная с горизонтальной координаты 300 пикс., хотя изгиб пластины происходит с 200 пикс. (см. формулу (3)). Это объясняется тем, что при моделировании точки переносились попикселно, т. е. дискретно. Вследствие непрерывного изменения смещения точек на фоновом экране вдоль горизонтальной оси и алгоритмов определения максимума корреляционной функции с субпикселной точностью результаты не носят дискретного характера.

Из рис. 3 следует, что малые размеры окна опроса приводят к ошибочным результатам при больших смещениях. При размере окна опроса 16×16 пикс. кросскорреляционная обработка в большинстве случаев дает нулевой результат, о чем говорит большое количество точек на графике, расположенных на горизонтальной оси. Увеличение размера окна опроса позволяет определить смещения на большем интервале. Однако большая площадь окна опроса усредняет значения смещений, непрерывно изменяющихся вдоль него, и дальнейшее увеличение приводит к появлению методической погрешности.

Для обработки смоделированного изображения оптимальным будет размер окна опроса 64×64 пикс. Этот выбор позволяет определить смещение на всем изображении, причем методическая погрешность, возникающая при больших окнах опроса, минимальна.

Для подтверждения полученных при моделировании результатов приведем результаты экспериментальных исследований. Был измерен угол поворота жесткой пластины. Пластина закреплена на шарнире с одного конца, второй конец поднимался с помощью координатного устройства. На поверхности пластины был закреплен фоновый экран, изображения которого регистрировались с помощью цифровой видеокамеры. В результате корреляционной обработки полученных изображений пластины и системы нормирования был измерен угол поворота пластины в разные моменты времени. Была исследована зависимость погрешности определения угла поворота от параметров обработки, результаты представлены на рис. 4, из которого следует, что полученные зависимости качественно совпадают. Размеры окон опроса в экспериментальных исследованиях были больше, чем при обработке смоделированных изображений, это объясняется большим смещением на экспериментальных изображениях. Однако общая картина зависимости сохраняется. При слишком малом размере окна опроса невозможно определить смещения во всем диапазоне, при слишком большом — увеличивается методическая погрешность.

Таким образом, проведено моделирование картин метода корреляции фоновых изображений поверхности с помощью алгоритмов численного интегрирования и дифференцирования. Анализ результатов моделирования позволяет определить влияние одного из ключевых параметров обработки — размера окна опроса. Выбор его оптимального размера зависит от параметров фонового экрана и характера изгиба.

Проведено сравнение полученных зависимостей с результатами экспериментальных исследований, которые качественно совпадают с результатами моделирования. Результаты исследований можно использовать при разработ-

ке адаптивных автоматических средств обработки картин МКФИ.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг., госконтракт П1936, и Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010)», проект № 2.2.2.2.5691.

Литература

1. **Разумовский И. А.** Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.

2. **Волков И. В.** Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натурных конструкций // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 1. С. 82—89.

3. **Kirmse T., Wagner A.** Advanced methods for in-flight flap gap and wing deformation measurements in the project AWIATOR // Proc. First CEAS Europ. Air and Space Conf. Berlin (Germany), 2007. P. 1—6.

4. **Удалов А. В.** Аппаратно-программный комплекс теневого фонового метода для натурных исследований: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 2010.

Дата принятия 08.07.2010 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

536.508.1

Мини-ячейки для воспроизведения кривых плавления галлия и индия в микропроцессорных калибраторах температуры

Е. В. ВАСИЛЬЕВ, С. А. КОНОНОГОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: vasiliev@vniims.ru

Приведены результаты работ по исследованию мини-ячеек для воспроизведения кривых плавления галлия и индия в микропроцессорных калибраторах температуры серий АТС и RTC. Полученные результаты перспективны для использования кривых плавления известных и новых термометрических веществ с целью совершенствования метрологического обеспечения прецизионной термометрии.

Ключевые слова: *кривая плавления, фазовый переход, стабильность, калибратор температуры, термометрическое вещество.*

Investigation results of mini-cells for of Ga and In reproduction melting curves in microprocessor-based temperature calibrators ATC and RTC series are given. The obtained results are revealing new possibilities for perspective usage of melting curves of well-known and new thermometrical substances for metrological assurance perfection of high-precision thermometry.

Key words: *melting curve, phase transition, stability, temperature calibrator, thermometrical substance.*

Современное поколение цифровых микропроцессорных приборов для измерений сопротивления и температуры позволяет с высокой точностью измерять выходные сигналы эталонных платиновых термометров сопротивления (ЭТС) и индивидуально градуируемых термопреобразователей сопротивления. Однако для повышения точности измерений этого недостаточно, так как качество измерений температуры в значительной степени зависит от метрологического уровня первичных преобразователей температуры. В настоящее время единственным способом повышения точности этих преобразователей является их индивидуальная градуировка при температурах фазовых переходов термометрических веществ.

Термодинамические методы воспроизведения постоянных температур положены в основу Международной температурной шкалы 1990 г. (МТШ-90) [1]. Основные принципы и способы воспроизведения первичных реперных точек МТШ-90 в стандартных ампулах приведены в [2]. Для градуировки ЭТС наивысшей точности применяются дорогостоящие ампулы с большим объемом металлов высокой чистоты и сложные установки для воспроизведения и поддержания равновесного состояния чистых металлов при их затвердевании. По этой причине данное метрологическое оборудование применяется, главным образом, в национальных метрологических институтах и физических лабораториях, участвующих в международных сличениях. Так, ВНИИМ