

А. В. БОЛОХОВЦЕВ¹

ЧБЕ ЕН УН¹, д-р техн. наук, проф.

Д. Г. КАЛИНОВ², *канд. техн. наук*

¹Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия)

²ООО «Тордоки» (Хабаровск, Россия)

БЕСКОНТАКТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УГЛА ЗАКРУЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПО СПЕКЛ- ИЗОБРАЖЕНИЮ: ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСИ КРУЧЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрено применение корреляционного анализа спекл-изображений для бесконтактного оптического контроля крутильной деформации поверхности материала: угол закручивания определяется методом циклической взаимной корреляции сигналов, сформированных по концентрическим окружностям. Исследовано влияние погрешности определения оси кручения: смещение оси порождает систематическое смещение оценки, растущее быстрее линейного, при слабом росте случайной составляющей. Ось определяется по самим изображениям – совместной минимизацией рассогласования, опорного и повернутого кадров по координатам оси и углу с погрешностью $\sim 0,001$ пикселя, что удерживает систематическое смещение на уровне $\sim 0,0002^\circ$. Достигнутая погрешность случайной составляющей $\zeta_{max} \approx 0,003^\circ$ соответствует уровню прецизионного оптического контроля на штатной КМОП камере без когерентного источника.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, оптический контроль, крутильная деформация, угол закручивания, спекл-паттерн, циклическая взаимная корреляция, ось кручения, систематическая погрешность, определение оси кручения.

1. Введение

Контроль напряжённо-деформированного состояния материалов и элементов, работающих на кручение, – типичная задача технической диагностики и неразрушающего контроля (НК) [1, 2]. Угол закручивания нагруженного участка однозначно связан со сдвиговой деформацией и касательными напряжениями его поверхности, то есть отражает крутильное напряжённо-деформированное состояние объекта – измеряемый параметр в задачах диагностики. При малых углах контактная тензометрия даёт удовлетворительные результаты при низком отношении сигнал/шум, поэтому предпочтительны бесконтактные оптические методы, регламентированные стандартами оптического НК [3].

Один из таких подходов – корреляционный анализ спекл-изображений: поверхность с текстурой регистрируется до и под нагрузкой, а угол закручивания находят по максимуму циклической взаимной корреляции одномерных сигналов, формируемых вдоль концентрических окружностей вокруг оси кручения [4, 5]. На результат влияет не только алгоритм формирования сигнала, но и, погрешность привязки оси кручения, которая напрямую переносится в оценку угла.

Погрешность привязки оси кручения неизбежна из-за конечной точности установки образца и определения оси. В двумерном (полевом) методе цифровой корреляции изображений (Digital Image Correlation, DIC) исследовались устойчивость к большим поворотам и влияние начального приближения на сходимость [6, 7], однако ось (центр) вращения там не является параметром метода. В корреляционных же методах на основе выборки вдоль концентрических окружностей центр задаётся явно, и погрешность определения его местоположения напрямую искажает формируемый сигнал. При этом количественный анализ погрешности влияния этого эффекта для одномерных методов отсутствует.

Цель работы – количественно оценить влияние погрешности определения оси кручения на погрешность измерения угла закручивания и предложить способ её минимизации.

2. Измерительная система и метод

Метод измерения. Метод основан на формировании одномерных угловых сигналов $f(\theta)$ и $g(\theta)$ вдоль окружности радиуса R вокруг оси кручения из двух спекл-изображений поверхности – исходного (ненагруженного) и деформированного (под крутящей нагрузкой). Угол закручивания оценивается по положению максимума их циклической взаимной корреляции

$$C[k] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n]g[(n+k) \bmod N], \varphi = \frac{k^*}{N} \cdot 360^\circ \quad (1)$$

где k^* – номер отсчёта, при котором циклическая корреляция $C[k]$ максимальна; N – число отсчётов; φ – оценка угла закручивания.

Положение максимума корреляционной функции $C[k]$ уточняется до дробного значения квадратичной аппроксимации пика в окрестности ± 7 отсчётов; интенсивность в точках с дробными координатами вычисляется билинейной интерполяцией по четырём соседним пикселям (субпиксельное разрешение при малых затратах).

При кручении поперечное сечение поворачивается как жёсткий диск на угол закручивания ν ; именно этот угол измеряется по спекл-изображению – независимо от радиальной неоднородности сдвига, которая проявляется лишь как осевой градиент dv/dz (z – координата вдоль оси). Тем самым измеренный угол ν несёт информацию о напряжённо-деформированном состоянии участка: при рабочей длине L сдвиговая деформация поверхности на радиусе r от оси равна $\gamma = r \cdot \nu / L$, а касательное напряжение $\tau = G \cdot \gamma$ (G – модуль сдвига). Поэтому достижимая погрешность определения ν задаёт чувствительность контроля по деформации и напряжению и определяется рассматриваемой ниже точностью привязки оси кручения.

Оптическая установка. Регистрация выполнялась компактной оптической установкой (КОУ, рис. 1) из короткофокусного объектива, КМОП-

матрицы UM012C 2592×1944 пикс. [8] и кольцевой подсветки. Изображения приводились к градациям серого.



Рис. 1. Внешний вид компактной оптической установки (КОУ)

Условия эксперимента. Контролируемая поверхность несёт случайную текстуру – частицы графита (50 – 100 мкм) на матовом фоне, зафиксированные нитролаком (спекл-подобный паттерн в смысле DIC, а не лазерный спекл). Для каждого из 36 углов формировалось по 99 пар «опорный кадр – повёрнутый». Опорный и повёрнутый – это два независимых реальных снимка неподвижной мишени, один из которых повёрнут программно (аффинным преобразованием вокруг заданной оси), поэтому случайная составляющая ζ_{max} отражает независимый шум КМОП-матрицы [8], а не коррелированный. Диапазон углов закручивания $\varphi = 0,333^\circ - 350,333^\circ$ с шагом 10° ; начальное смещение $0,333^\circ$ уводит от точного совпадения с пиксельной сеткой и от тривиального нуля. Ось вращения предварительно находилась итерационным перебором координат с минимизацией суммы квадратов разностей интенсивностей опорного и повёрнутого кадров (погрешность привязки $\sim 0,001$ пикселя). Показатели погрешности – максимальные по диапазону СКО ζ_{max} (случайная составляющая) и смещение среднего ΔX_{max} (систематическая).

3. Влияние погрешности определения оси кручения

Геометрическая модель. Пусть истинная ось кручения проходит через точку О, а используемая в алгоритме смещена относительно неё на вектор S (модуль S , направление α_S). При закручивании на угол φ точка Р на расстоянии r от О переходит в Р', также удалённую на r ; окружность радиуса R с центром в смещённой оси проходит через Р лишь приближённо, с отклонением порядка S . Для выборки вдоль такой окружности локальная фаза сигнала смещается на

$$\Delta\varphi \approx \frac{S \sin(\alpha - \alpha_S)}{R} \text{ [рад]} \quad (2)$$

Локальный сдвиг зависит от углового положения точки на окружности; его амплитуда – порядка S/R (при $R = 116$ и $S = 1$ пиксель $S/R = 0,49^\circ$). После усреднения по окружности результирующее систематическое смещение оценки

остаётся того же порядка, $\Delta X_{max} \sim S/R$. Точная форма зависимости $\Delta X_{max}(S)$ определяется угловым откликом конкретного спекл-паттерна и здесь не выводится.

Эксперимент (п. 3.2) согласуется с этой оценкой по порядку: $\Delta X_{max} \approx 0,5^\circ$ при $S = 1$ пикселя (совпадает с S/R) и приблизительно $1,5^\circ$ при $S = 2$; при малых S ($< 0,1$ пикселя) смещение ограничено снизу алгоритмическим полом $\sim 0,02^\circ$, а при больших S превышает линейную оценку S/R . Случайная составляющая ζ_{max} реагирует на S существенно слабее.

Экспериментальное исследование. Смещение S вводилось как намеренная ошибка координат оси кручения при вычислении сигнала; диапазон $S = 0,01\text{--}2,0$ пикселя, для каждого S по $99 \text{ парам} \times 36$ углам вычислялись ζ_{max} и ΔX_{max} (рис. 2). Радиус анализа фиксирован ($R = 116$ пикселей): согласно $\Delta X_{max} \sim S/R$, увеличение R снижает чувствительность к погрешности оси, но усиливает декорреляцию; зависимость показателей от R составляет предмет отдельного исследования.

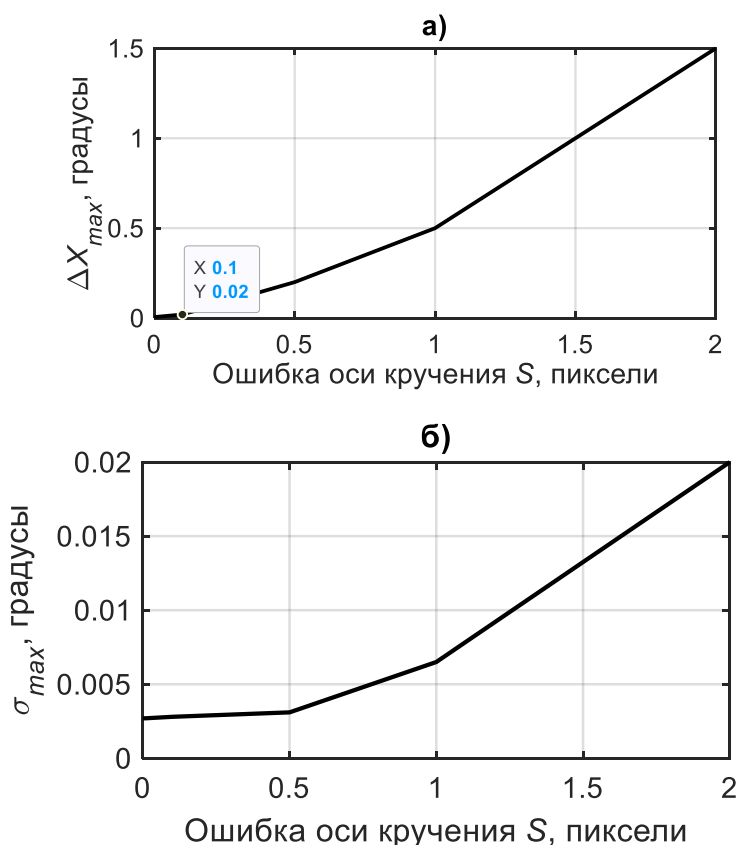


Рис. 2. Зависимость показателей погрешности от ошибки определения оси кручения: а) – систематическая составляющая; б) – случайная составляющая

При $S < 0,1$ пикселя погрешность определяется алгоритмом ($\zeta_{max} \approx 0,003^\circ$, $\Delta X_{max} \approx 0,02^\circ$). С ростом S систематическая составляющая быстро доминирует: при $S = 1$ пикселя $\Delta X_{max} \approx 0,5^\circ$ – почти на два порядка выше $\zeta_{max} \approx 0,0065^\circ$, при $S = 2$ – $\approx 1,5^\circ$; ζ_{max} растёт медленнее, от $0,003^\circ$ до $0,02^\circ$. Таким образом, ошибка

привязки оси проявляется прежде всего как систематическое смещение, устранимое точным определением оси.

Определение оси кручения. Ось кручения определяется по самим изображениям – совместной минимизацией суммы квадратов разностей интенсивностей опорного и повернутого кадров по координатам оси и углу поворота. Достижимая точность привязки $\sim 0,001$ пикселя удерживает систематическое смещение на уровне $\sim 0,0002^\circ$ – значительно ниже случайной составляющей $\zeta_{max} \approx 0,003^\circ$, то есть метод работает в алгоритмически-ограниченном режиме. Следует оговорить: это значение получено в идеализированном вычислительном эксперименте, где прямая (аффинный поворот) и обратная (минимизация SSD) модели тождественны; на реальной нагрузке декорреляция спекла, расфокус и перспектива при рабочем расстоянии 2,5 см, собственно сдвиговая деформация поверхности и неравномерность подсветки ухудшат привязку оси, поэтому $\sim 0,001$ пикселя следует считать верхней оценкой возможностей метода.

Дрейф оси во времени (тепловые расширения, вибрации) обесценивает однократно найденную ось. Поскольку определение оси не требует эталонов, его можно повторять на каждом измерении – тогда ось остаётся актуальной и дрейф не влияет ценой дополнительных вычислений. Если же ось фиксируют ради быстродействия, требуется механическая или термическая стабильность оптического модуля.

4. Обсуждение

Выделены два режима контроля по доминирующему источнику погрешности: алгоритмически ограниченный: $S < 0,1$ пикселя; погрешность задаётся алгоритмом и структурой паттерна ($\zeta_{max} \approx 0,003^\circ$, $\Delta X_{max} \approx 0,02^\circ$); ограниченный привязкой оси: $S > 0,1$ пикселя – доминирует смещение X_{max} ; улучшение алгоритма не помогает – ось нужно определить точнее или повторить её поиск при дрейфе.

Достижение режима А требует лишь точной привязки оси кручения – условия, не зависящего от алгоритма формирования сигнала и обеспечиваемого самим определением оси по изображениям.

Сравнение с опубликованными методами носит ориентировочный характер из-за разных постановок задач и тестовых данных. Прецизионные когерентно-оптические методы точнее: голографическая микроскопия [9] даёт $\approx 0,0001^\circ$, но требует лазера и виброзащиты. Прикладные методы грубее: 1D - фазовая корреляция с радон-преобразованием [10] – ошибка $\approx 0,05\text{--}0,2^\circ$ (в среднем $\sim 0,11^\circ$), двухмасштабная кольцевая проекция [11] – до $0,05^\circ$, оценка поворота по признакам (HOG) [12] – $\sim 1\text{--}1,6^\circ$.

5. Заключение

1. Метод обеспечивает бесконтактное определение угла закручивания поверхности со случайной составляющей $\zeta_{max} \approx 0,003^\circ$ на штатной КМОП-камере без когерентного источника. Для двухсеченной схемы (база $L = 50$ мм) этому соответствовало бы разрешение $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ по сдвиговой деформации и ~ 1 МПа по напряжению (сталь); реализация такой схемы и выявление дефектов по аномалиям угла – предмет дальнейшей работы.

2. Погрешность S привязки оси кручения даёт систематическое смещение, растущее быстрее линейного ($\approx 0,5^\circ$ при $S = 1$ пиксель, порядка S/R), тогда как ζ_{max} к S малочувствительна. Поскольку ось определяется по самим изображениям с точностью $\sim 0,001$ пикселя, это смещение остаётся пренебрежимым ($\sim 0,0002^\circ$).

Список литературы

1. Любутин П. С., Панин С. В., Титков В. В. и др. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // Вестник науки Сибири. 2020. № 1(36). С. 13–52.
2. Niezrecki C., Baqersad J., Sabato A. Digital image correlation techniques for non-destructive evaluation and structural health monitoring // Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation. Cham: Springer, 2019. P. 1545–1590.
3. ГОСТ Р 58399–2019. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
4. Tsai D.-M., Tsai Y.-H. Rotation-invariant pattern matching with color ring-projection // Pattern Recognition. 2002. Vol. 35, No. 1. P. 131–141.
5. Zhang L., Lin S. Z. Rotated image matching and correction method based on improved circular projection // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 401–403. P. 1484–1488.
6. Zhong F., Quan C. Digital image correlation in polar coordinate robust to a large rotation // Optics and Lasers in Engineering. 2017. Vol. 98. P. 153–158.
7. Wu R., Qian H., Zhang D. Robust full-field measurement considering rotation using digital image correlation // Measurement Science and Technology. 2016. Vol. 27, No. 10. P. 105002.
8. Болоховцев А. В., Калинов Г. А., Чье Е. У. Исследование шумовой составляющей сигнала КМОП-матрицы // Датчики и системы. 2025. № 283. С. 56–61.
9. Wu Y., Cheng H., Wen Y. High-precision rotation angle measurement method based on a lensless digital holographic microscope // Applied Optics. 2018. Vol. 57, No. 1. P. 112–118.
10. Fujisawa T., Ikehara M. High-accuracy image rotation and scale estimation using Radon transform and sub-pixel shift estimation // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 22719–22728.
11. Xie P., Lu Z.-R., Lin G. et al. A ring-projection-based two-scale approach for accurate digital image correlation of large translations and rotations // Experimental Mechanics. 2024. Vol. 64. P. 875–893.
12. Bratanič B., Pernuš F., Likar B., Tomaževič D. Real-time rotation estimation using histograms of oriented gradients // PLoS ONE. 2014. Vol. 9, No. 3. P. e92137.

Контакты:

chev_@mail.ru (Болоховцев Антон Васильевич);

000487@togudv.ru (Чье Ен Ун);

kalinov.d.g@gmail.com (Калинов Денис Геннадьевич).