

illumination // Proc. SPIE. 1996. V. 2899. P. 230–239.

5. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
6. В. А. Афанасьев. Оптические измерения. М.: Недра, 1968.
7. Д. Малакара. Оптический производственный контроль / Пер. с англ. под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985.
8. М. Франсон. Оптика спеклов / Пер. с франц. под ред. проф. Ю. И. Островского. М.: Мир, 1980.
9. Majorov E. E., Prokopenko V. T. A limited-coherence interferometer system for examination of biological objects // Biomed. Eng. 2012. V. 46. No 3. P. 109–111.
10. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. 2013. Т. 23. № 2. С. 38–46.
11. Майоров Е. Е. Метод устранения влияния декорре-

ляции спекл-полей на точность измерений и динамический диапазон интерференционного сигнала // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 329–332.

12. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров Г. Г., Черняк Т. А. Алгоритмы обработки информационного сигнала компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей. // Научное приборостроение. 2015. Т. 25. № 4. С. 61–66.

13. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров А. Г., Черняк Т. А. Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 5. С. 388–394.

Дата принятия: 24.04.2017.

004.932

Алгоритм компенсации влияния деформаций при использовании теневого фонового метода

А. Ю. ПОРОЙКОВ, О. А. ЕВТИХИЕВА, И. Н. ПАВЛОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия, e-mail: poroykovay@gmail.com

Разработан алгоритм компенсации искажений изображений под действием деформации поверхности фонового экрана при использовании теневого фонового метода. Подтверждена работоспособность алгоритма. Экспериментально определён оптимальный маркер для поиска на изображении. Рассмотрены возможности алгоритма по компенсации сдвига и поворота поверхности фонового экрана со средним квадратическим отклонением не более 0,43 пиксела, определяемым кросскорреляционной обработкой.

Ключевые слова: теневой фоновый метод, метод корреляции фоновых изображений, измерение потоков, измерение деформации, цифровая обработка изображений.

The algorithm for compensation of image distortion due the affect of surface deformation of background pattern with usage of background oriented schlieren (BOS) was developed. The algorithm performance is validated are described in details. The optimal marker for search in image was discovered experimentally. The possibilities of the algorithm for background pattern surface shifting and rotating compensation with the standard deviation not more than 0.43 pixel obtained by cross-correlation processing were considered.

Key words: background oriented schlieren (BOS), image pattern correlation technique (IPCT), flow measurement, deformation measurement, digital image processing.

Теневой фоновый метод (ТФМ) был предложен Ж. Мейером в 1999 г. [1] и основан на искажении изображений структурированных фоновых экранов малыми градиентами показателя преломления при прохождении света через оптические неоднородности. Достоинством ТФМ является простота реализации. Для проведения измерений и обработки полученных изображений необходимы фоновый экран, цифровая видеокамера и персональный компьютер с программным обеспечением, построенным на хорошо извест-

ных и апробированных алгоритмах кросскорреляционной обработки [2]. Фоновый экран представляет поверхность, на которую нанесён специально структурированный рисунок.

Теневой фоновый метод используют при исследовании крупномасштабных потоков в натуральных экспериментах. В этом случае снимаются ограничения, вызванные размерами оптических приборов и присущие как классическим теневым, так и интерференционным методам [3, 4].

Экспериментальные изображения (картины ТФМ) реги-

стрируются цифровой видеокамерой. Между экраном и объективом располагается оптическая неоднородность, искажающая изображение. Если неоднородность отсутствует, то каждая точка изображения на экране идеально отображается на плоскости матричного фотоприёмника; если присутствует, то лучи, формирующие изображение точек, отклоняются, и отображение на плоскости смещается. В результате получаются два изображения фонового экрана: опорное (без искажения) и измерительное (с искажением). Далее выполняется кросскорреляционная обработка – разбиение этих изображений на небольшие участки (окна опроса) и нахождение корреляционной функции для каждой пары окон. Затем определяется максимум функции, по координатам которого находится смещение точек в окне опроса.

Одной из проблем при экспериментальных исследованиях с применением ТФМ, особенно в натурных условиях, являются дополнительные смещения и деформации фонового экрана. Вся информация об изучаемом объекте восстанавливается по смещениям точек фонового экрана, возникающим в присутствии градиента показателя преломления в оптическом канале, поэтому ТФМ становится чувствительным к дополнительным сдвигам самого фонового экрана, или той поверхности, на которой он закреплён. Источником таких смещений могут служить вибрации и деформации аэродинамических поверхностей на моделях летательных аппаратов при их обдуве в аэродинамических трубах.

Стоит отметить, что паразитные (для ТФМ) деформации могут быть основными измеряемыми величинами, например, в методе корреляции фоновых изображений (МКФИ) [5–8]. В этом случае необходимо компенсировать искажения от неоднородностей в оптическом канале. В [9] для определения деформации поверхности прибегают к расчёту хода лучей, чтобы избежать искажений, вносимых воздушным потоком, обдувающим эту поверхность.

Таким образом, для успешного применения ТФМ в экспериментальных исследованиях актуальна разработка ал-

горитма компенсации деформации фонового экрана. Основная цель алгоритма – разделение воздействий на изображения фонового экрана, обусловленных оптической неоднородностью и деформацией экрана. Такое разделение не только расширит применимость метода, но и позволит одновременно визуализировать воздушные потоки и измерять деформации поверхностей, рядом с которыми эти потоки возникают. Данная работа посвящена разработке основных принципов построения алгоритма компенсации деформации, поэтому далее под деформацией будем понимать сдвиг поверхности и её поворот вокруг произвольной оси.

Обработка ТФМ-картин основана на статистических принципах, т. е. перемещение отдельных точек не отслеживается, а рассчитывается корреляционная функция для небольшого участка изображения. В общем случае смещения, вызываемые изменением показателя преломления, значительно меньше смещений вследствие деформации, которые могут превышать размеры окон опроса.

Для разделения воздействий деформации и градиента показателя преломления на фоновом экране размещают специальные отметки – маркеры. По их расположению можно судить о деформации фонового экрана. Для точного обнаружения маркеров их размер должен быть значительно больше размеров точек фонового экрана. Рекомендуемые размеры точек составляют 2–3 пиксела (для метода PIV – particle image velocimetry) [10]. Поэтому размер маркеров на изображении должен составлять не менее 20–30 пикселей.

Предлагаемый алгоритм компенсации представлен на рис. 1. На первом этапе необходимо найти положение маркеров на изображении. Для этого был выбран наиболее простой в реализации метод – расчёт корреляционной функции. Функцию можно получить несколькими способами: через преобразование Фурье [11] или по быстрому алгоритму [12–14]. Основные преимущества данного метода – высокое быстродействие и возможность применения маркеров произвольного вида. Недостатком является невысокая точность нахождения маркеров при их геометрических искажениях.

Второй этап предлагаемого алгоритма состоит в нахождении параметров искажения изображения фонового экрана. Для этого необходимо выбрать математическую модель учёта деформации, например, классическую полиномиальную модель. Были использованы полиномы второй степени с восемью параметрами и третьей степени, учитывающий нелинейность вследствие поворота фонового экрана [15].

Третий этап алгоритма – компенсация искажений изображения, обусловленных деформацией фонового экрана. Для решения этой задачи подходит классический алгоритм восстановления изображений после их геометрических искажений. Так как на предыдущем шаге параметры этого искажения уже были

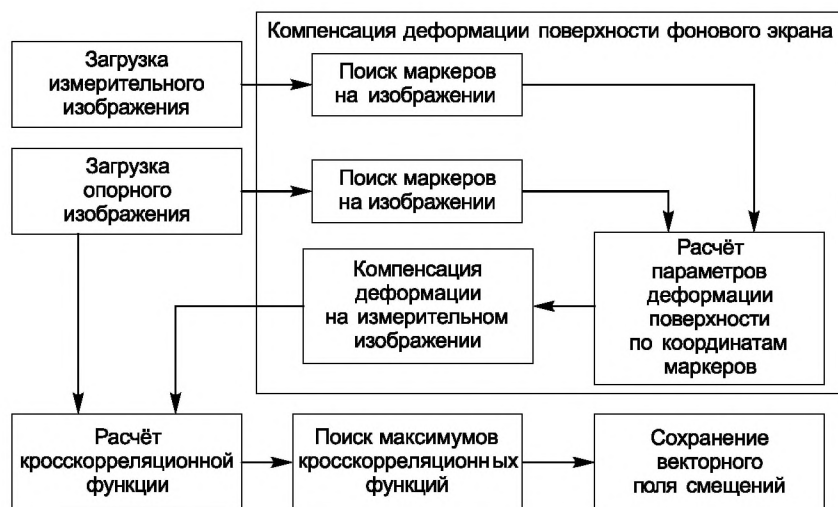


Рис. 1. Алгоритм обработки ТФМ-картин для компенсации деформации поверхности фонового экрана

определены, остается только рассчитать обратное преобразование искажённого изображения. Для увеличения точности восстановления изображений можно применить билинейную интерполяцию [11].

Экспериментальные исследования. С целью выбора наиболее оптимального маркера для применения алгоритма компенсации деформации поверхности фонового экрана было исследовано влияние вида маркера на точность его обнаружения. Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из видеокамеры 1, подключённой к персональному компьютеру, фонового экрана 3 с типичным структурированным рисунком, закреплённого на двухкоординатном линейном трансляторе 4 с возможностью поворота экрана в вертикальной плоскости на заданный угол. На фоновый экран нанесены четыре маркера различного вида. Маркер № 1 представляет решётку с центральной частью в виде креста, маркеры №№ 2, 3, 4 – концентрические круги в различных комбинациях. Круглые маркеры широко используются в видеограмметрических [16] и геодезических [17] исследованиях.

Методика исследования точности нахождения маркеров состояла из следующих шагов:

- 1) по команде компьютера транслятор фиксировал экран в начальном положении;
- 2) компьютер подключался к видеокамере и регистрировал начальное изображение;
- 3) по команде компьютера транслятор перемещал экран в случайное положение, отличное от начального;
- 4) компьютер подключался к видеокамере и регистрировал изображение в смещённом положении;
- 5) для набора статистики пп. 3, 4 повторялись 100 раз;
- 6) экран поворачивался на 2° , и повторялись измерения по пп. 3–5.

Амплитуда перемещений экрана в ходе эксперимента составила 50 мм, угол поворота варьировался в диапазоне $0\text{--}30^\circ$.

После регистрации всех изображений проводилась их обработка. Рассчитывалась нормированная корреляция экспериментального изображения с шаблоном маркера. По максимуму корреляционной функции, найденному с субпиксельной погрешностью, определялось местонахождение маркера на изображении. Погрешность координат маркера вычислялась как разница между рассчитанным смещением маркера (между начальным и изменённым положениями) и заданным случайным перемещением, которое передавалось на транслятор. По итогам обработки экспериментальных данных были получены зависимости погрешности нахождения маркера и усреднённого нормированного коэффициента корреляции от угла поворота плоскости фонового экрана для четырёх маркеров.

По результатам эксперимента оптимальным маркером для дальнейшей разработки алгоритма был признан маркер № 2. Погрешность измерения его положения находится в диапазоне средних значений (не более 0,3 пиксела при углах менее 15° и не более 0,8 пиксела для углов менее 30°). Коэффициент корреляции, который определяет возмож-

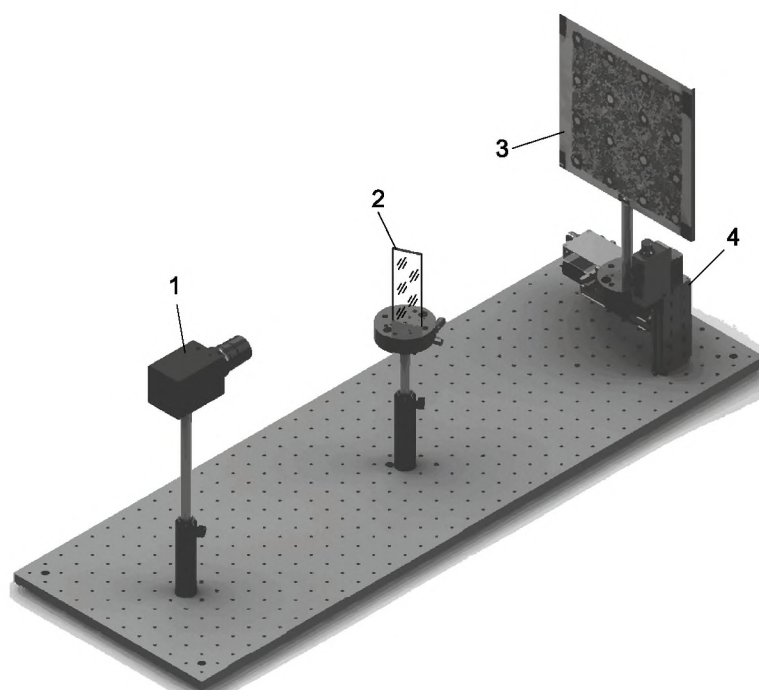


Рис. 2. Экспериментальная установка для проверки работоспособности разработанного алгоритма:

1 – видеокамера; 2 – стеклянная пластинка; 3 – фоновый экран; 4 – двухкоординатный линейный транслятор с поворотным столиком

ность поиска на изображении, составляет не менее 0,6 и 0,4 при углах соответственно менее 15° и 30° и уступает только коэффициенту корреляции маркера № 4, погрешность измерения которого слишком высока.

Для проверки работоспособности алгоритма в состав экспериментальной установки (см. рис. 2) было включено крепление со стеклянной пластинкой – моделью градиента показателя преломления, присутствующего в реальных экспериментах ТФМ. На фоновый экран нанесено несколько экземпляров признанного оптимальным маркера № 2. Вначале для оценки качества компенсации были получены изображения без стеклянной пластинки. В ходе эксперимента были сняты изображения фонового экрана в начальном положении (опорное), в положении только со сдвигом и в положении только с поворотом. Были испытаны два фоновых экрана. Первый содержал четыре маркера, а второй – 16.

Для оценки качества исправления изображений после деформаций была рассчитана разность исходного и исправленного изображений и проведена их корреляционная обработка. Результаты сравнения представлены в таблице. Установлено, что изображение с большим количеством меток было исправлено значительно точнее изображения с четырьмя метками. Полином большей степени лучше описывает нелинейность, возникающую при деформациях. Стоит отметить, что среднее квадратическое отклонение (СКО) вектора смещения, рассчитанное для экрана с 16 маркерами, составляет менее 0,01 пиксела, что является заявляемой погрешностью для промышленных программ

Оценка качества компенсации деформаций фонового экрана с различным количеством маркеров

Вид деформации	СКО яркости, отн. ед.		СКО смещения по вертикали (горизонтالي), пиксeлы	
	4 маркера	16 маркеров	4 маркера	16 маркеров
Сдвиг без градиента	16	4,2	0,68 (0,56)	0,0063 (0,0066)
Поворот без градиента	33	36,0	20,00 (0,56)	0,4600 (0,1500)
Сдвиг с градиентом	–	–	0,17 (0,10)	0,1500 (0,2900)
Сдвиг и поворот с градиентом	–	–	6,30 (0,34)	0,4300 (0,4000)

кросскорреляционной обработки. Следовательно, выбранный алгоритм позволяет в полной мере компенсировать сдвиг фонового экрана.

Для оценки возможности восстановления градиента показателя преломления в оптическом канале при деформации экрана была использована стеклянная пластинка. Сдвиг фонового экрана с четырьмя маркерами удалось компенсировать. При обработке векторное поле, вызванное действием градиента показателя преломления, совпадает с полем, полученным при обработке недеформированного изображения. Однако не удалось скомпенсировать поворот. Искажения, оставшиеся после исправления, значительно превышают смещения, обусловленные нахождением стеклянной пластинки в оптическом канале. Из-за малого количества маркеров использовался полином второй степени, поэтому не удалось полноценно учесть нелинейные искажения, вызванные поворотом экрана.

Для фонового экрана с большим количеством маркеров была проведена такая же обработка, однако полученные векторные поля носили хаотический характер и качественно не совпадали с векторным полем, полученным при об-

работке недеформированного изображения. Предположительно это вызвано влиянием градиента показателя преломления. Координаты маркеров, определённые в ходе обработки измерительного изображения, содержали смещения вследствие как деформации экрана, так и наличия стеклянной пластинки. Поэтому в дальнейшем исправление искажений про-

изводилось неверно.

Для проверки этого предположения из решения системы уравнений были удалены метки, попавшие на изображение под стеклянную пластинку. Оставшихся десяти меток было достаточно для расчёта искомых коэффициентов полинома. При таком подходе деформацию фонового экрана удалось компенсировать как при сдвиге, так и при одновременном сдвиге и повороте экрана. Результаты обработки изображения модифицированным способом представлены на рис. 3.

Заклyчение. Получен работоспособный алгоритм компенсации влияния деформаций при использовании ТФМ, позволяющий компенсировать сдвиг и поворот фонового экрана. Для применения алгоритма необходимо наносить на фоновый экран метки специальной формы в количестве не менее четырёх для сдвига и не менее восьми для поворота фонового экрана. Определяемые кросскорреляционной обработкой СКО при компенсации деформации составляют не более 0,29 и 0,43 пиксeла для сдвига и поворота экрана, соответственно.

Алгоритм построен на известных приёмах цифровой обработки изображений и требует дальнейших исследований. Основные направления таких исследований – разработка алгоритма автоматического определения маркеров, смещённых под действием градиента показателя преломления, для их исключения при поиске коэффициентов полинома, а также рассмотрение использования информации о взаимном расположении маркеров на поверхности фонового экрана для увеличения точности компенсации деформаций.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60026 мол_а_дк.

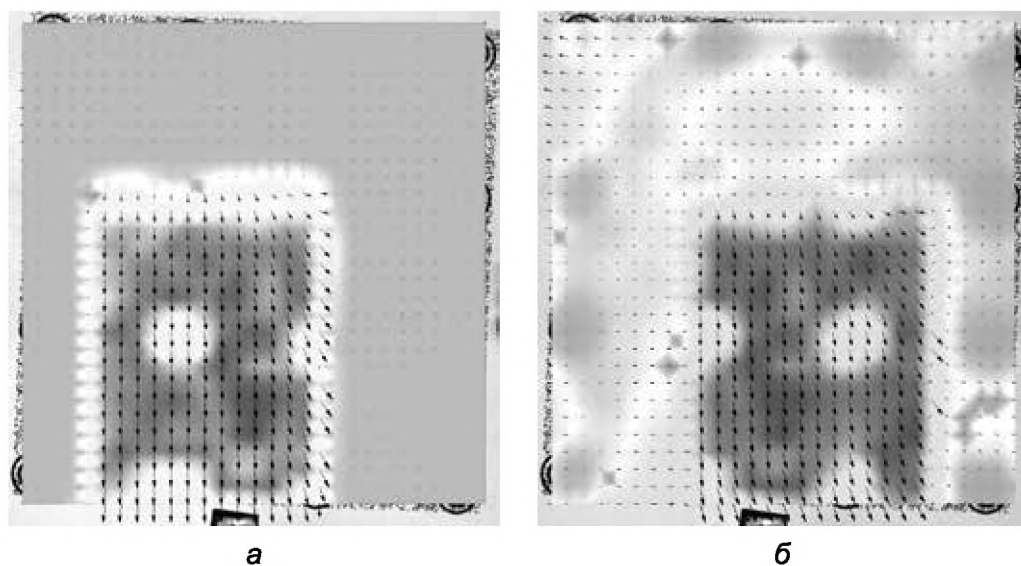


Рис. 3. Результаты обработки ТФМ-изображений экрана с большим количеством маркеров в положениях после сдвига (а) и после сдвига и поворота (б)

Л и т е р а т у р а

1. **Meier G. E. A.** Computerized background-oriented schlieren // *Experiments in Fluids*. 2002. V. 33. P. 181–187.
2. **Raffel M., Willert C., Kompenhans J.** Particle image Velocimetry. A practical guide. Berlin: Springer, 2007.
3. **Boden F., Kirmse T., Jentink H.** Image pattern correlation technique (IPCT) // *Advanced Flight Testing Workshop AIM-2: Handbook of Advanced in Flight Meas. Techniq.* Norderstedt: BoD–Books on Demand, 2013. P. 63–85.
4. **Скорнякова Н. М.** Теневой фоновый метод // *Современные оптические методы исследования потоков / Под ред. Б. С. Ринкевичюса*. М.: Оверлей, 2011. С. 93–107.
5. **Boden F., Jentink H., Petit C.** Wing Deformation Measurements on a Large Transport Aircraft (IPCT) // *Advanced In-Flight Measurement Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 93–115.
6. **Поройков А. Ю., Скорнякова Н. М.** Анализ метода корреляции фоновых изображений для измерения изгиба металлической поверхности // *Измерительная техника*. 2010. № 10. С. 43–46.
7. **Поройков А. Ю.** Восстановление 3D-профиля деформированной металлической пластины методом корреляции фоновых изображений // *Измерительная техника*. 2014. № 14. С. 15–19.
8. **Boden F., Kirmse T., Poroikov A. Yu., Rinkevichyus B. S., Skornyakova N. M., Shashkova I. A.** Accuracy of Measurement of Dynamic Surface Deformations by the Image Pattern Correlation Technique // *Optoelectronics, Instrum. and Data Proc.* 2014. V. 50. No 5. P. 474–481.
9. **Kirmse T., Gardner A., Krombholz C.** Investigation of Aero-Optical Effects in Model Deformation Measurements in a Transonic Flow // *Investigation of Aero-Opt. Effects in Model Deformation Meas. in a Transonic Flow*. 2013. V. 121. P. 665–672.
10. **Keane R. D., Adrian R. J.** Theory of cross-correlation analysis of PIV images // *Flow Visualization and Image Analysis*. 1993. P. 1–25.
11. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2005.
12. **Frigo M., Johnson S. G.** The Design and Implementation of FFTW3 // *Proc. IEEE*. 2005. V. 93(2). P. 216–231.
13. **Lewis J. P.** Fast normalized cross-correlation // *Proc. Vision Interface*. 1995. P. 120–123.
14. **Haralick M. R., Shapiro G. L.** Computer and Robot Vision. V. II. N.Y.: Addison-Wesley, 1992. P. 316–317.
15. **Шапиро З. Л., Стокман Дж.** Компьютерное зрение. М.: Бином Лаборатория знаний, 2009.
16. **Кулеш В. П.** Видеограмметрическая система для измерений деформаций крупномасштабной модели в потоке аэродинамической трубы // *Датчики и системы*. 2013. № 8(171). С. 7–12.
17. **Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржин А. В.** Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. М.: Физматкнига, 2010.

Дата принятия: 14.04.2017.

