

Исследование влияния поворота оси объектива к оси матрицы видеокамеры на глубину резкости

О. В. Печинская, Е. Д. Сангаджиева, Н. М. Скорнякова

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,
e-mail: ZhukovaOV@mpei.ru, rina.sangadzhieva@bk.ru, SkorniakovaNM@mpei.ru

Исследовано влияние поворота оси объектива к оси матрицы видеокамеры в оптической системе, оснащённой адаптером Шаймпфлюга. Для оптических систем, плоскость матрицы приёмника которых не перпендикулярна оптической оси объектива, предложена методика определения области резко изображаемого пространства по изображению фонового экрана. Описана установка для съёмки фоновых экранов, содержащая адаптер Шаймпфлюга. Получены распределения среднего квадратического отклонения каждого столбца матрицы изображения фонового экрана относительно нулевого столбца для различных взаимных положений осей матрицы видеокамеры и объектива.

Ключевые слова: глубина резкости, глубина резко изображаемого пространства, адаптер Шаймпфлюга, наклон объектива.

В процессе современных оптических исследований возникает необходимость располагать регистрирующую аппаратуру так, чтобы оптические оси объектива и матрицы приёмника не были параллельны друг другу. Например, при изучении деформации крыла самолета методом корреляции фоновых изображений конструктивно невозможно добиться параллельности плоскостей объектива и наблюдений: оптическая система находится либо в салоне, либо на фюзеляже [1]. Широкое распространение получили измерительные стереосистемы. Большая часть публикаций по стереосистемам посвящена их калибровке и не затрагивает вопросов качества получаемых изображений [2–4].

Измерительные системы с возможностью наклона объектива или камеры оснащаются усложнённой модификацией обычного адаптера – адаптером Шаймпфлюга. При использовании указанных систем можно изменять глубину резкости, корректировать перспективные искажения и получать полностью резкие изображения наклонных протяжённых предметов. В настоящей работе рассматривается управление глубиной резкости, для чего достаточно располагать возможностью наклона объектива. Основы такой съёмки были заложены Жюлем Карпентье и Теодором Шаймпфлюгом в начале XIX в. В дальнейшем теория съёмки с коррекцией искажений была развита Гарольдом Мерклингером [5]. В работе [5] изложены оптические принципы съёмки карданной камерой, а также приведены практические рекомендации по фотосъёмке в различных условиях. Тем не менее, работа [5] относится скорее к научно-популярным изданиям. Научных исследований, посвящённых регистрации высококачественных изображений в оптических системах с возможностью наклона объектива или матрицы, очень мало. Необходимость данных исследований связана с увеличением числа измерительных задач, требующих применения оптических систем с наклоном объектива.

Экспериментальная установка. Величину, характеризующую размер области резко изображаемого пространства в системах с наклонными объективами либо матрицами, можно

отсчитывать в пространстве предметов не вдоль оптической оси как глубину резко изображаемого пространства (ГРИП) для классических оптических систем, а перпендикулярно плоскости резкой фокусировки или вдоль плоскости, параллельной плоскости приёмника. Также возможен вариант отсчёта вдоль луча от объектива до некоторой точки изображения [5], в пределах которого резкость данного кадра будет наилучшей. Для систем с наклоном объектива ГРИП определяют аналогично.

Для оценки зависимости глубины резкости объектива от угла наклона объектива была проведена серия экспериментов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Некогерентный источник излучения ИИ освещает фоновый экран ФЭ. Изображение экрана формируется фотографическим объективом О и регистрируется цифровой камерой. Поворот объектива относительно матрицы видеокамеры ВК осуществляется адаптером Шаймпфлюга АШ.

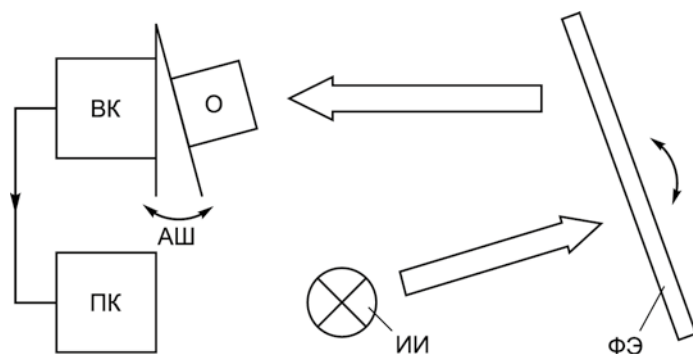


Рис. 1. Схема эксперимента:

ПК – персональный компьютер; ВК – видеокамера; О – объектив;
АШ – адаптер Шаймпфлюга; ИИ – некогерентный источник излучения;
ФЭ – фоновый экран

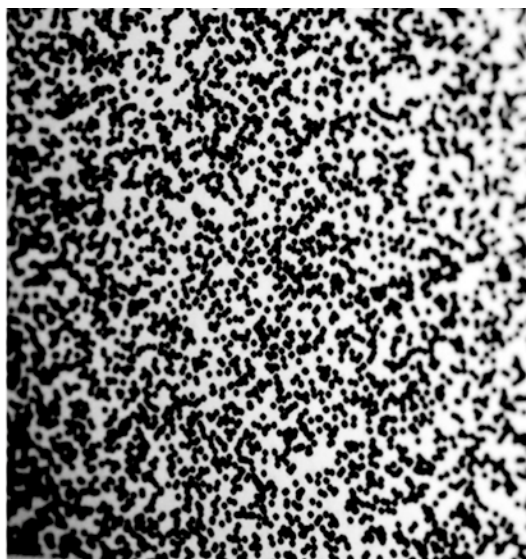


Рис. 2. Изображение фонового экрана dot pattern, полученное экспериментально

Для получения серии снимков устанавливают угол α поворота адаптера в диапазоне $0-20^\circ$ с шагом 5° , фоновый экран разворачивают на угол $\theta=0...80^\circ$ с шагом 10° и записывают кадр. Следующий кадр записывается для того же положения адаптера и нового положения экрана. После достижения максимального угла поворота экрана его возвращают в исходное положение (перпендикулярно оптической оси системы), устанавливают следующее значение угла поворота адаптера и записывают новую серию кадров для текущего угла поворота адаптера и различных положений фонового экрана. В качестве фонового экрана использован так называемый dot pattern: серые и чёрные соосные кружки на белом фоне. Диапазоны изменений углов выбраны таким образом, чтобы охватить все возможные варианты взаимного положения экрана и объектива. Расстояние от экрана до объектива вдоль оптической оси составило $l=1,5$ м. Применена следующая аппаратура: тилт-адаптер LaVision Scheimpflug mount version 3; объектив Nikon Nikkor 24мм 1:2,8; цифровой приёмник Altami на базе CMOS-матрицы Aptina. Адаптер обеспечивает угол поворота объектива относительно камеры в диапазоне $0-20^\circ$, а также вращение камеры вокруг оптической оси в диапазоне $0-360^\circ$ с последующей фиксацией камеры в требуемом положении. Формат матрицы цифрового приемника $1/2,5''$, размер пиксела $2,2 \times 2,2$ мкм.

Алгоритм определения глубины резкости. На рис. 2 приведён пример экспериментального изображения. Центральная часть кадра резкая, края изображения расфокусированы. Область резко изображаемого пространства ориентирована параллельно оси вращения адаптера Шаймпфлюга, в данном случае – вертикально.

Одним из вариантов определения глубины резкости может быть оценка изменения среднего квадратического отклонения (СКО) σ каждого j -го столбца матрицы изображения относительно нулевого столбца. Сравнение каждого последующего столбца с нулевым обеспечивает нормирование распре-

ления СКО. Использование распределения СКО отдельных столбцов в качестве критерия определения ГРИП не позволило бы сравнивать между собой распределения, полученные для разных углов поворота матрицы видеокамеры, так как они не имеют общей точки отсчёта.

Введём матрицу m размером $r \times 2$, состоящую из нулевого и j -го столбцов матрицы изображения M . Тогда СКО j -го столбца матрицы M σ_j относительно нулевого может быть рассчитано как квадратный корень из дисперсии элементов матрицы m :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{2r} \sum_{i=0}^{r-1} \sum_{k=0}^1 (m_{i,k} - \bar{m})^2}, \quad (1)$$

где r – число строк матрицы m ; i, k – номера строки и столбца соответственно; $\bar{m} = \frac{1}{2r} \sum_{i=0}^{r-1} \sum_{k=0}^1 m_{i,k}$ – среднее значение элементов матрицы m .

СКО изменяется от столбца к столбцу, так как ось поворота объектива параллельна столбцам изображения. При повороте вокруг горизонтальной оси сравнение следует выполнять построчно. При ориентации оси поворота объектива произвольным образом необходимо учитывать возможную целесообразность использования иного критерия определения изменения фокусировки по кадру. Как правило, адаптеры Шаймпфлюга позволяют вращать камеру вокруг оптической оси и тем самым согласовывать ось поворота объектива со столбцами или строками изображения.

На рис. 3 приведены примеры зависимости СКО σ от номера столбца j , полученной с использованием программы Mathcad. Для интерполяции результатов применялась функция interp, вектор коэффициентов полиномиальной регрессии – результат применения функции regress. Порядок полиномиальной регрессии может быть выбран по коэффициенту детерминации k : считается, что результаты интерполированы с достаточной точностью при $k > 0,8$. Коэффициент детерминации дискретного набора экспериментальных данных и функции интерполяции определяется как квадрат коэффициента корреляции векторов σ и f :

$$k = \left[\frac{\sum_{j=0}^{c-1} [(\sigma_j - \bar{\sigma})(f_j - \bar{f})]}{\sqrt{\sum_{j=0}^{c-1} (\sigma_j - \bar{\sigma})^2 \sum_{j=0}^{c-1} (f_j - \bar{f})^2}} \right]^2, \quad (2)$$

где σ – вектор значений СКО; f – вектор значений функции интерполяции $f(j)$, соответствующих аргументу j – номеру столбца матрицы M ; $\bar{\sigma} = \frac{1}{c} \sum_{j=0}^{c-1} \sigma_j$, $\bar{f} = \frac{1}{c} \sum_{j=0}^{c-1} f_j$ – средние значения векторов σ и f соответственно; c – число столбцов матрицы M .

Алгоритм обработки изображения состоит из следующих операций: загрузка изображения M ; вычисление вектора значений СКО; определение порядка n полиномиальной регрессии; интерполяция данных с определением коэффициента детерминации k .

Анализ экспериментальных результатов. Зависимости СКО для фиксированного угла поворота экрана (см. рис. 3) имеют тенденцию к уменьшению ширины распределения с увеличением угла наклона объектива. Хотя указанные зависимости $\sigma(j)$ выявляют качественный характер изменений резкости по полю изображения, открытым остаётся вопрос о выборе критерия,

по которому можно было бы количественно оценить размер области, отображаемой резко. Классические критерии – уровень e^{-1} , ширина на полувысоте (FWHM) – применимы не ко всем распределениям. Это объясняется, в том числе, смещением центра фонового экрана относительно центра матрицы при повороте объектива и появлением в кадре фрагментов изображений других предметов при развороте экрана. Используемый в работе тилт-адаптер осуществляет только наклон и не обладает функцией сдвига, что не позволяет совместить центр фонового экрана с центром матрицы.

Оценка ширины области резко изображаемого пространства по значению дисперсии с выбором подходящей нормировки является предметом дальнейших исследований.

Заключение. Проведённый анализ показал принципиальную возможность оценки глубины резкости в оптических системах с адаптером Шаймпфлюга по изображениям фонового экрана. Для всех исследованных комбинаций положений фонового экрана и поворота оси объектива к оси матрицы видеокамеры установлено уменьшение ширины распределения с увеличением угла α поворота объектива. Это свидетельствует о сужении зоны резко изображаемого пространства при увеличении угла поворота, что не противоречит визуальным наблюдениям. Заметим, что результаты получены для произвольных комбинаций углов поворота объектива α и экрана θ , при этом угол поворота экрана не всегда соответствует плоскости наилучшей фокусировки для конкретного угла поворота объектива.

Для проведения количественного анализа необходимо определить критерий и нормировку, которые позволят получить числовые данные, согласующиеся с визуальными.

Литература

1. Ružička P., Rydel J., Josefik M., Boden F., Lanari C. (2013) Assessment of Propeller Deformation Measurement Techniques for Industrial Application. In: Boden F., Lawson N.,

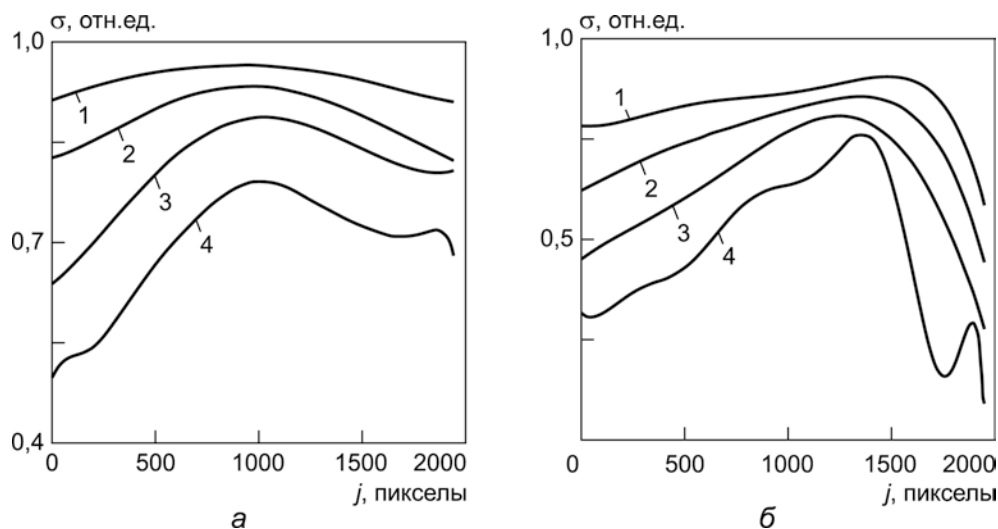


Рис. 3. Распределения СКО σ для углов поворота адаптера $\alpha=5^\circ$ (1), 10° (2), 15° (3), 20° (4) и экрана $\theta=20^\circ$ (а), 60° (б)

Jentink H., Kompenhans J. (eds) Advanced In-Flight Measurement Techniques. Research Topics in Aerospace. Springer, Berlin, Heidelberg.

2. Louhichi H., Fournel T., Lavest J., BenAssia H. Self-calibration of Scheimpflug cameras: an easy protocol // Measur. Sci. Technol. 2007. V. 18. No. 8. P. 2616–2632.

3. Li J., Guo Y., Zhu J., Lin X., Xin Y., Duan K., Tang Q. Large Depth-of-view portable three-dimensional laser scanner and its segmental calibration for robot vision // Opt. Laser Eng. 2007. V. 45. P. 1077–1087.

4. Nocerino E., Menna F., Remondino F., Beraldin J.-A., Cournoyer I., Reain G. Experiments of calibrating tilt-shift lenses for close-range photogrammetry // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. XXIII ISPRS Congress. 2016. V. XLI-B5. P. 99–105. DOI: 10.5194/isprarchives-XLI-B5-99-2016.

5. Merklinger Harold M. Focusing the View Camera. Published by the author: Harold M. Merklinger P. O. Box 494 Dartmouth, Nova Scotia Canada, B2Y 3Y8. Internet Edition (v. 1.6.1) 8 Jan 2007. [Электрон. версия] URL: <http://bookre.org/reader?file=829887> (дата обращения 10.09.2018).

Дата принятия: 14.09.2018.

Investigation of the influence lens axis inclination to the camera sensor axis on depth of field

O. V. Pechinskaya, E. D. Sangadzhieva, N. M. Skornyakova

National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

In the report are represented the results of experimental investigation of the influence photographic lens axis inclination to the camera sensor axis for the optical system with Scheimpflug adapter, for an object at a finite distance. A method of determining the depth of field by the image of the background pattern for optical systems in which the plane of the digital camera matrix is not perpendicular to the optical axis of the lens is proposed. Described facility for the background pattern image capturing, the rotation of the lens which is carried out using the Scheimpflug adapter. The distributions of the mean square deviation across the background pattern image for different mutual positions of the axes of the camera matrix and lens are obtained.

Key words: depth of field, depth of object, Scheimpflug adapter, tilt lens.