

УДК 004.94

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННО-РАЗМЫТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫМ КОНТУРОМ ГРАНИЦЫ

Ф.М. Иночкин^{a,b}, Н.Р. Белашенков^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

Адрес для переписки: fedor.inochkin@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.06.18, принята к печати 20.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-826-833

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Иночкин Ф.М., Белашенков Н.Р. Вычислительно-эффективный метод численного моделирования дифракционно-размытых изображений объектов с кусочно-линейным контуром границы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 826–833. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-826-833

Аннотация

Предмет исследования. Исследована задача численного моделирования изображений объектов с заданным контуром границы с учетом дифракционного размытия изображения оптической системой и его пространственной дискретизации фотоприемником. Предложено вычислительно-эффективное решение в условиях допущения об аппроксимации контура границы множеством прямых отрезков. **Метод.** Для решения задачи предложен метод, основанный на аналитическом численном расчете фурье-образа оптического изображения многоугольника, ограничивающего объект. Полоса частот для расчета определяется дифракционным пределом оптической системы и частотными характеристиками текстуры объекта и фона. **Основной результат.** Предлагаемое техническое решение позволило на 2–3 порядка снизить время моделирования по сравнению с субпиксельным моделированием в пространственной области при шаге субпиксельной дискретизации 10^{-2} пикселя. Вычислительная сложность предлагаемого решения не зависит от субпиксельной точности воспроизведения геометрии моделируемого объекта. **Практическая значимость.** Предложенный метод может быть использован для решения обратных задач в области оптического измерения геометрии объектов и исследования работы алгоритмов обработки изображений с ошибкой воспроизведения геометрических параметров порядка 10^{-1} – 10^{-4} пикселя.

Ключевые слова

моделирование изображений, расчет фурье-образа, субпиксельная оценка положения границы, метод центра тяжести, дифракционный предел, параллельные вычисления

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО в рамках реализации проекта 074-11-2018-004 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

COMPUTATIONALLY EFFECTIVE NUMERICAL SIMULATION METHOD FOR DIFFRACTION-BLURRED IMAGES OF OBJECTS WITH PIECEWISE-LINEAR EDGE CONTOUR

F.M. Inochkin^{a,b}, N.R. Belashenkov^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

Corresponding author: fedor.inochkin@gmail.com

Article info

Received 18.06.18, accepted 20.07.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-826-833

Article in Russian

For citation: Inochkin F.M., Belashenkov N.R. Computationally effective numerical simulation method for diffraction-blurred images of objects with piecewise-linear edge contour. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 826–833 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-826-833

Abstract

Subject of Research. The paper presents research of numerical image simulation for objects with known edge contour, considering optical diffraction blur and image sensor spatial sampling. Computationally effective solution is proposed under restriction of edge contour approximation by a set of straight lines. **Method.** Proposed method is based on the analytical numerical computation of the Fourier transform for the object bounding polygon. Calculus bandwidth is defined by the optical system diffraction limit and spatial frequency response of the object and background textures. **Main Result.** Proposed technical solution results in 2-3 order less computation time compared to a subpixel image simulation in spatial domain with subpixel sampling step value of 10^{-2} pixel. Computational complexity of the proposed approach is invariant with respect to a subpixel accuracy of simulated object geometry representation. **Practical Relevance.** Proposed approach may be applied to a solution of inverse problems in the field of optical geometrical measurements and to a study of image processing algorithms with geometrical parameters representation error on the order of 10^{-1} - 10^{-4} pixel.

Keywords

image simulation, Fourier transform calculus, subpixel edge location, center of gravity method, diffraction limit, parallel computing

Acknowledgements

The research is carried out in ITMO University (grant 074-11-2018-004) under the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Введение

Численные модели изображений являются неотъемлемым инструментом современной методологии решения широкого спектра задач, связанных с построением, анализом и оптимизацией оптических и оптико-электронных систем. Области применения таких моделей включают в себя метрологические исследования измерительных систем и алгоритмов обработки изображений, генерацию обучающих и (или) тестовых выборок в приложениях машинного обучения, решения обратных задач оценки параметров и идентификации объектов по их изображениям. Одной из фундаментальных проблем построения численных моделей является снижение времени моделирования (объема вычислений) при одновременном повышении их точности. Актуальность проблемы повышения вычислительной эффективности методов моделирования изображений связана не только с ускорением вычислительных экспериментов в исследовательских задачах, но также и с развитием оптимизационных и модельно-ориентированных методов решений обратных задач обработки изображений, при которых модель изображения включается в измерительный контур.

Данная работа посвящена проблеме моделирования дифракционно-размытых изображений объектов с четкими границами, т.е. имеющих ступенчатый перепад яркостных характеристик между объектом и фоном в пространстве предметов. В отличие от изображений без размытия, отсчеты которых могут быть аппроксимированы простыми аналитическими выражениями на основе площади покрытия пикселя моделируемым объектом [1], моделирование размытых изображений является задачей нетривиальной. Сложность задачи обусловлена зависимостью яркости каждого пикселя изображения от геометрических и яркостных свойств объекта в протяженной окрестности, чей размер определяется шириной функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы.

Один из наиболее простых методов моделирования таких изображений основан на применении стандартных алгоритмов компьютерной графики с повышенной частотой дискретизации и последующим прореживанием результата моделирования [2]. Такой метод позволяет сравнительно легко получить изображения с субпиксельной точностью из моделей пиксельного уровня, но при этом является вычислительно неэффективным. Известны более эффективные решения, основанные на численном интегрировании выражений, описывающих аналитическую модель изображения [3]. Оба подхода основаны на вычислениях в пространственной области, что приводит к росту объема вычислений при повышении точности воспроизведения геометрических параметров объекта.

Принципиально иной подход к моделированию изображений предоставляет переход к вычислениям в фурье-области. Благодаря тому, что фурье-коэффициенты позволяют кодировать субпиксельное смещение сигналов путем изменения фазовой составляющей, представляется возможным рассчитать изображение с теоретически неограниченной точностью воспроизведения геометрии объекта. Идея моделирования изображений путем расчета их фурье-образа уже применялась, например, для задач исследования алгоритмов субпиксельной оценки положения объектов [4, 5]. Однако известные подходы в фурье-области позволяют эффективно моделировать лишь простые объекты, чей образ может быть рассчитан аналитически. Аналитический способ расчета фурье-образа объекта с произвольной границей и (или) яркостью не известен. Такое решение может быть получено, если принять допущение о кусочно-линейной аппроксимации контура границы.

Модель изображения и постановка задачи

Предположим, что объект имеет замкнутую границу, заданную последовательностью точек $\{P_i=(x_i, y_i), i=1..N\}$. Также будем считать, что двумерные пространственные распределения яркости объекта и фона заданы как функции декартовых координат, обозначим их $I_{OB}(x, y)$ и $I_{BG}(x, y)$ соответственно.

Тогда, опуская преобразование координат оптической системой, яркость условно-идеального изображения объекта может быть представлена следующим образом:

$$I' = I_{OB}M + I_{BG}(1 - M),$$

где $M(x, y)$ – функция бинарной маски объекта. Под условно-идеальным изображением объекта здесь имеется в виду изображение без размытия оптической системы. Функция бинарной маски $M(x, y)$ является индикатором принадлежности точки плоскости изображения к множеству точек ограничивающей объект фигуры (Ω):

$$M(x, y) = \begin{cases} 0, & (x, y) \notin \Omega, \\ 1, & (x, y) \in \Omega. \end{cases}$$

Из теории фурье-оптики известно, что в некогерентном освещении влияние размытия изопланатической оптической системы описывается сверткой с ФРТ [6]. Таким образом, без учета влияния шумов регистрируемое дискретное изображение примет следующий вид:

$$\mathbf{I} = \downarrow \left(\left[I_{OB}M + I_{BG}(1 - M) \right] * q * s \right), \quad (1)$$

где « \downarrow » – оператор дискретизации; « $*$ » – оператор свертки; q – ФРТ оптической системы; s – апертурная характеристика элементов раstra фотоприемника. Свертка ($q*s$) определяет импульсный отклик системы, обозначим его h . На рис. 1 приведен пример модельного изображения и соответствующих ему $\{P_i\}$, I_{OB} , I_{BG} .

Задачей алгоритма моделирования является расчет значений отсчетов дискретного изображения \mathbf{I} при заданных параметрах $\{P_i\}$, I_{OB} , I_{BG} и импульсном отклике системы h .

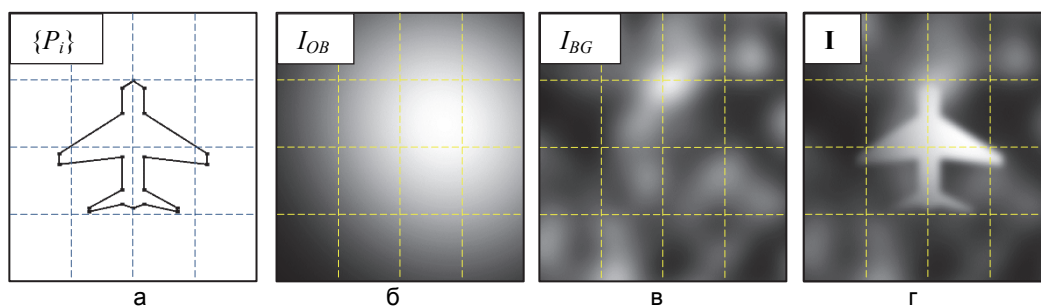


Рис. 1. Пример модели изображения: контур объекта (а), яркость объекта (б), яркость фона (в), дискретное моделируемое изображение (г). Размер изображения (г) – 100×100 пикселей

Метод моделирования

Сформулируем модель изображения в фурье-области путем применения теоремы о свертке к модели в пространственной области (1):

$$\mathbf{I} = \downarrow \left(F^{-1} \left[\left(F(I_{OB}) * F(M) + F(I_{BG}) * F(1 - M) \right) F(h) \right] \right), \quad (2)$$

где F и F^{-1} – прямое и обратное непрерывные преобразования Фурье.

Далее рассмотрим задачу моделирования отдельно для случаев равномерной и неравномерной яркости объекта и фона. С целью наглядности изложения принципов, лежащих в основе предлагаемого метода, рассмотрим сначала частный случай (равномерная яркость), а затем перейдем к общему случаю.

В случае равномерной яркости объекта и фона $I_{OB}(x, y) = \text{const}$, $I_{BG}(x, y) = \text{const}$. С учетом этого модель изображения (2) упрощается:

$$\mathbf{I} = \downarrow \left(F^{-1} \left[\left(I_{OB}F(M) + I_{BG}F(1 - M) \right) F(h) \right] \right).$$

Для расчета матрицы изображения \mathbf{I} предлагается аппроксимировать непрерывный фурье-образ бинарной маски объекта M его дискретным представлением, что в пространственной области соответствует следующей аппроксимации:

$$\downarrow \left(F^{-1} \left[F(M) \right] \right) \approx \Phi^{-1} \left[\downarrow F(M) \right], \quad (3)$$

где Φ^{-1} – обратное дискретное преобразование Фурье. Также для дальнейших рассуждений будем считать, что частота дискретизации моделируемого изображения \mathbf{I} удовлетворяет условию теоремы Котельникова. Тогда на основе аппроксимации (3) запишем выражение, описывающее процесс моделирования в случае равномерной яркости:

$$\mathbf{I} \approx \Phi^{-1} \left[\left(I_{OB}\mathbf{F}_M + I_{BG}[\delta - \mathbf{F}_M] \right) \cdot \mathbf{F}_h \right],$$

где \mathbf{F}_M и \mathbf{F}_h – дискретные фурье-образы бинарной маски M и импульсного отклика системы h ; δ – дискретный фурье-образ равномерного единичного сигнала, произведение матриц – поэлементное. Задача сводится к аналитическому расчету фурье-образа бинарной маски (т.е. матрицы \mathbf{F}_M). Для этого восполь-

зуюсь допущением о кусочно-линейной аппроксимации контура объекта. Такие контуры могут быть разделены на множество непересекающихся треугольников (соответствующие алгоритмы описаны, например, в [7]). Коэффициенты фурье-образа каждого из треугольников вычисляются аналитически с применением лишь элементарных тригонометрических операций (методика расчета предложена в следующем разделе), следовательно, процедура вычислительно эффективна и может быть выполнена с высокой точностью. Вследствие свойства аддитивности преобразования Фурье искомым образом F_M есть сумма комплексных фурье-образов всех треугольников разбиения.

В случае неравномерной яркости предлагается воспользоваться уже полученным решением задачи для случая равномерной яркости. Для этого перепишем выражение модели изображения (2) с учетом аппроксимации (3) в следующей форме:

$$I \approx (I_{OV} \Phi^{-1}(F_M) + I_{BG} [U - \Phi^{-1}(F_M)]) * h, \quad (4)$$

где I_{OV} и I_{BG} – дискретные распределения яркости объекта и фона; U – матрица, все элементы которой равны 1; h – дискретное представление импульсного отклика. Таким образом, в случае неравномерной яркости расчет изображения бинарной маски осуществляется в фурье-области, а остальные вычисления выполняются в пространственной области (рис. 2).

Выражение (4) описывает алгоритм моделирования в виде математических операций над дискретными матрицами той же размерности, что и само моделируемое изображение, субпиксельной дискретизации не требуется. За исключением вопроса выбора полосы частот, алгоритм расчета матрицы F_M в случае неравномерной яркости такой же, как и в случае равномерной.

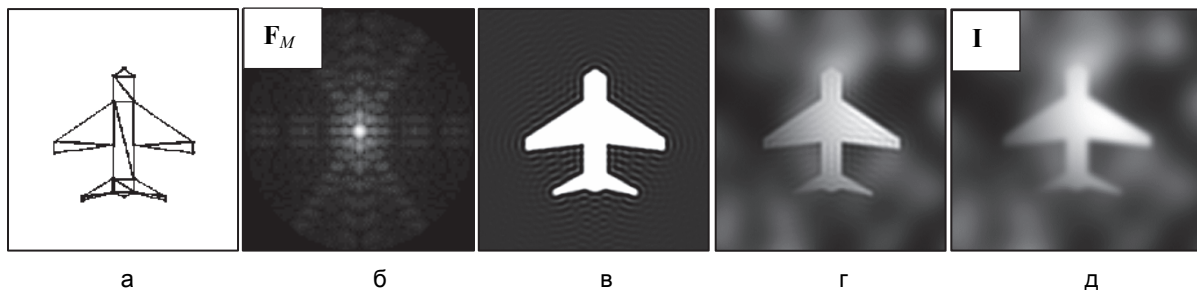


Рис. 2. Этапы моделирования: триангуляция (а); расчет фурье-образа бинарной маски (б); обратное преобразование Фурье (в); перемножение с распределениями яркости (г); результат (д). Изображения (б)–(д) имеют одинаковые размеры

Ключевым вопросом, связанным с применением предлагаемого метода, является определение полосы частот для расчета фурье-образа. Как следует из (2), полоса частот моделируемого изображения ограничена полосой частот импульсного отклика системы и, вследствие дифракционного предела оптической системы, является конечной величиной. Соответственно, в случае равномерной яркости расчет F_M также следует проводить в пределах той же дифракционно-ограниченной полосы частот.

При неравномерной яркости объекта или фона полоса частот для расчета F_M определяется не только дифракционным ограничением оптической системы, но и частотными характеристиками распределений яркости I_{BG} и I_{OV} . Поскольку в фурье-области свертка функций бинарной маски и распределений яркости осуществляется до перемножения с фурье-образом импульсного отклика, то на результирующий фурье-образ в пределах дифракционно-ограниченной полосы частот оказывают влияние и те участки частотного спектра, которые находятся вне этой полосы. Аналогичный эффект смещения пространственно-частотного спектра объекта в полосу частот пропускания оптической системы применяется, например, в методах оптического сверхразрешения на основе структурированного освещения [8]. Таким образом, при расчете фурье-образа бинарной маски в случае неравномерной яркости объекта или фона следует расширить полосу частот на величину, равную наибольшей из предельных частот функций, описывающих распределения яркости, а сами эти функции следует строить таким образом, чтобы их частотный спектр был строго ограничен.

Следует отметить, что введенное ранее требование выполнения условия теоремы Котельникова для частоты дискретизации на практике зачастую не удовлетворяется. Для учета этого эффекта в предлагаемой модели следует промоделировать изображение по формуле (4) в пределах указанной выше полосы частот, (так, как если бы условие теоремы Котельникова выполнялось), а затем провести передискретизацию смоделированного изображения с необходимым шагом.

Аналитический расчет фурье-образа треугольника

В соответствии с определением преобразования Фурье комплексный коэффициент двумерного фурье-образа для пространственной частоты (ω_x, ω_y) задается следующим интегральным выражением:

$$F_M(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} M(x, y) \exp(-i[\omega_x x + \omega_y y]) dx dy, \quad (5)$$

где $M(x, y)$ – бинарная маска объекта. Для треугольника, заданного точками (ABC) ,

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in (ABC) \\ 0, & (x, y) \notin (ABC) \end{cases}.$$

На декартовой плоскости (x, y) множитель $\exp(-i[\omega_x x + \omega_y y])$ задает гармоническое колебание с частотой $\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$ и углом поворота $\alpha = \arctan(\omega_y / \omega_x)$ (рис. 3).

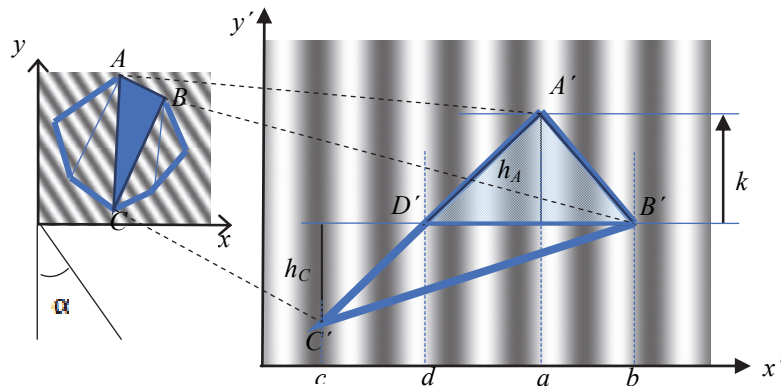


Рис. 3. К расчету фурье-образа треугольника

Поскольку функция M принимает только лишь значения 0 или 1, интеграл (5) можно переписать следующим образом:

$$F_M(\omega_x, \omega_y) = \iint_{(x, y) \in (ABC)} \exp(-i[\omega_x x + \omega_y y]) dx dy.$$

Теперь повернем систему координат на угол α . Обозначим треугольник (ABC) в повернутой системе координат $(A'B'C')$. В повернутой системе координат последнее выражение эквивалентно:

$$F_M(\omega_x, \omega_y) = \iint_{(x', y') \in (A'B'C')} \exp(-i\omega x') dx' dy'. \quad (6)$$

Определим на отрезке $(A'C')$ такую точку (D') , что прямая $(B'D')$ параллельна оси абсцисс в повернутой системе координат. Теперь представим искомый фурье-коэффициент в виде суммы коэффициентов для треугольников $(A'B'D')$ и $(C'B'D')$:

$$F_M(\omega_x, \omega_y) = F_{(A'B'D')}(\omega_x, \omega_y) + F_{(C'B'D')}(\omega_x, \omega_y). \quad (7)$$

Обозначим высоту треугольника $(A'B'D')$ – h_A , а высоту треугольника $(C'B'D')$ – h_C . Тогда, исходя из геометрического смысла интеграла (6), фурье-коэффициенты каждого из этих треугольников определяются следующими выражениями:

$$F_{(A'B'D')}(\omega_x, \omega_y) = \int_0^{h_A} \int_{d + \frac{k}{h_A}(a-d)}^{b - \frac{k}{h_A}(b-a)} \exp(-i\omega x') dx' dk, \quad F_{(C'B'D')}(\omega_x, \omega_y) = \int_0^{h_C} \int_{d - \frac{k}{h_C}(d-c)}^{b - \frac{k}{h_C}(b-c)} \exp(-i\omega x') dx' dk,$$

где (a, b, c, d) – значения абсцисс точек $(A'B'C'D')$ в повернутой системе координат; k – переменная внешнего интегрирования.

Решая интегралы, получим выражения для коэффициентов фурье-образа:

$$F_{(A'B'D')} = \begin{cases} \frac{h_A ([a-b] \exp(-i\omega d) + [b-d] \exp(-i\omega a) + [d-a] \exp(-i\omega b))}{\omega^2 (d-a)(a-b)}, & \omega^2 (d-a)(a-b) \neq 0; \\ \frac{h_A (\exp(-i\omega d) - \exp(-i\omega b) + [d-b] i \omega \exp(-i\omega b))}{\omega^2 (d-b)}, & \omega^2 (d-b) \neq 0; \\ \frac{h_A (b-d)}{2}, & \omega^2 (d-b) = 0. \end{cases}$$

Для $F_{(C'B'D')}$ получаем аналогичное выражение путем замены a на c и h_A на h_C . Искомый фурье-коэффициент $F_M(\omega_x, \omega_y)$ вычисляется как сумма (7).

Экспериментальная проверка модели

Для экспериментальной проверки соответствия предлагаемой численной модели реальным (натурным) изображениям проведем сравнение натурального и смоделированного изображений, полученных при одинаковых параметрах. В качестве модельного тест-объекта использован объект с псевдослучайным контуром из 64 отрезков, отличающихся углами поворота и протяженностью (рис. 4, а). Принимая во внимание высокую чувствительность предлагаемой модели, с целью минимизации отклонения параметров изображений параметры модельного изображения оценены по натурному изображению по методу, описанному в [9]. Частота дискретизации изображения в эксперименте в 2,5 раза выше удвоенной предельной частоты изображения. С целью минимизации шумов накоплено 100 изображений, и, кроме того, путем калибровки скомпенсирована неравномерность чувствительности и темнового сигнала элементов фотоприемника. Результаты эксперимента приведены на рис. 4, б–г. На разностном изображении (рис. 4, в) преобладает шумовой сигнал, что демонстрирует хорошее соответствие модельного и зарегистрированного изображений, а также адекватность предложенной аппроксимации (3). Величина шума на светлых и темных участках различается вследствие наличия мультипликативных составляющих шумов. Относительное среднеквадратическое отклонение изображений на светлых и темных участках составляет 0,3% и 0,1% соответственно (в абсолютном выражении: 0,42 и 0,15 отсчета 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя).

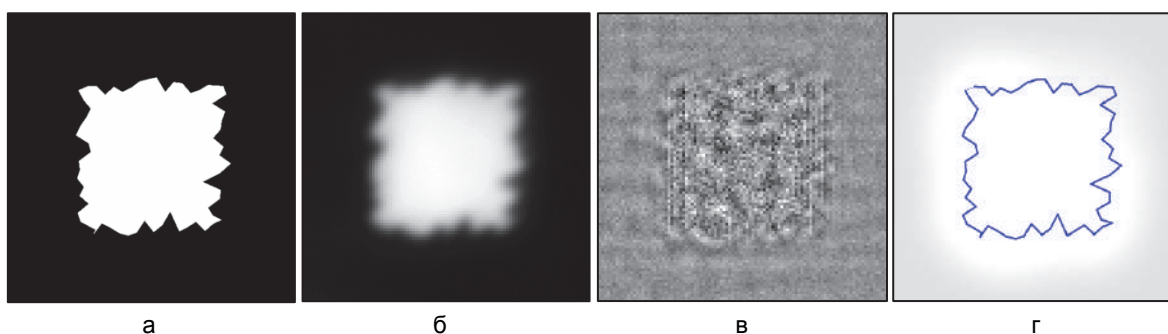


Рис. 4. Соответствие натурального и численно смоделированного изображений: идеальное изображение (а); зарегистрированное натурное изображение (б); разность натурального и смоделированного изображений (в); распределение яркости объекта с контуром границы (г). Контраст на разностном изображении усилен в 100 раз, размеры изображений – 100×100 пикселей

Оценка эффективности метода

Проведем оценку эффективности метода по критериям точности воспроизведения геометрии моделируемых объектов и быстродействию алгоритма моделирования. Результаты работы предлагаемого метода сравниваются с альтернативным методом, основанном на простом моделировании изображения с субпиксельным шагом дискретизации, аналогично использованному в [2] (метод субпиксельного раstra). Величина субпиксельного шага обозначена параметром d .

Точность воспроизведения геометрии. Для оценки точности воспроизведения геометрии проведем два вычислительных эксперимента, моделирующих типовые задачи измерений геометрических параметров объектов: измерение положения прямолинейных границ объектов (по методу субпиксельной оценки) и координат объектов (по методу центра тяжести). Субпиксельная оценка положения границы выполнена путем аппроксимации производной изображения функцией Гаусса, аналогично тому, как это описано в [10]. Метод центра тяжести применялся к изображению круга радиусом 10 пикселей, аппроксимированного 16 отрезками. Размеры моделируемых изображений и импульсного отклика – 100×100 пикселей, частота дискретизации равна удвоенной предельной частоты изображения. Смещение моделируемых объектов осуществлялось в пределах ± 1 пикселя. Для учета степени влияния краевых эффектов, вызванных конечным размером изображения, результаты для предлагаемого метода рассчитаны по изображениям с «полями» различной ширины (параметр W , [пиксель]). Результаты вычислительных экспериментов приведены в табл. 1.

Эксперимент	Субпиксельный растр			Фурье		
	$d=0,1$	$d=0,05$	$d=0,025$	$W=0$	$W=20$	$W=50$
Положение границы	$5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$		
Центр тяжести объекта	$13 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$

Таблица 1. Максимальная абсолютная ошибка измерения координат по модельному изображению (пиксель)

Быстродействие метода. В табл. 2 приведено время моделирования различных изображений, использованных в данной работе. Время моделирования включает расчет фурье-образа, обратное преобразование Фурье и свертку с импульсным откликом. Преобразование Фурье и свертка реализованы с применением библиотеки OpenCV, а алгоритм расчета фурье-образа реализован как в простой последовательной форме (C++), так и с помощью технологии параллельных вычислений OpenCL на центральном (CPU) и графическом (GPU) процессорах. Метод субпиксельного растра реализован с применением библиотеки OpenCV и вычислением на центральном процессоре, время моделирования включает в себя расчет изображения ограничивающего объект многоугольника, свертку с импульсным откликом и передискретизацию результата. Размеры моделируемых изображений и импульсного отклика – 100×100 пикселей. Расчет фурье-образа реализован в арифметике с плавающей запятой с двойной точностью (64 разряда), остальные вычисления реализованы с одинарной точностью (32 разряда). Вычисления проводились на ноутбуке с CPU Intel Core i5@3GHz и GPU NVIDIA GeForce GT740M.

Объект	N	Субпиксельный растр, CPU, OpenCV			Фурье, CPU, C++	Фурье, CPU, OpenCL	Фурье, GPU, OpenCL
		$d=0,1$	$d=0,05$	$d=0,025$			
Квадрат	4	390	1760	8200	18	15	14
Круг (16 отрезков)	16				55	25	20
Самолет (рис. 2)	20				120	42	31
Псевдослучайный контур (рис. 4)	64				742	222	127

Таблица 2. Время расчета изображений (мс)

Эффективность предлагаемого метода тем выше, чем меньшим числом отрезков (N) может быть аппроксимирована граница объекта. Учитывая приведенные выше характеристики точности, для достижения ошибки локализации элементов границы объекта в 10^{-2} пикселя потребуется на 2–3 порядка меньше времени, чем при использовании метода субпиксельного растра, при этом при снижении ошибки до уровня 10^{-3} пикселя эффективность возрастает до 4–5 порядков.

Заключение

Предложенный метод моделирования является эффективным инструментом формирования дискретных изображений объектов с кусочно-линейным контуром границы в условиях выраженного дифракционного размытия оптической системы и субпиксельной точности воспроизведения геометрии объектов. Высокая вычислительная эффективность метода позволяет не только сократить время расчетов в исследовательских приложениях, но и строить новые решения измерительных задач путем включения предложенной модели в измерительный контур [9]. К достоинствам предложенного решения следует отнести независимость вычислительной сложности от субпиксельной точности локализации элементов границы объекта, а также возможность быстро и без потери точности промоделировать множество изображений одного и того же объекта (или объектов с одной и той же формой контура) с разными распределениями яркости или импульсным откликом системы путем простых операций над однократно рассчитанным фурье-образом ограничивающего многоугольника. Следует также отметить, что метод может быть применен и для моделирования изображений без выраженного дифракционного размытия путем передискретизации результата. Вычислительная сложность метода при этом определяется полосой частот оптического изображения и не зависит от частоты дискретизации конечного изображения.

Литература

1. Trujillo-Pino A., Krissian K., Aleman-Flores M., Santana-Cedres D. Accurate subpixel edge location based on partial area effect // *Image and Vision Computing*. 2013. V. 31. N 1. P. 72–90. doi: 10.1016/j.imavis.2012.10.005
2. Bouchara F., Ramdani S. Subpixel edge refinement using deformable models // *Journal of the Optical Society of America A*. 2009. V. 26. N 4. P. 820–832. doi: 10.1364/josaa.26.000820
3. Mizotin M.M. Subpixel edge detection in the problem of determining the surface tension from an axisymmetric drop profile // *Computational Mathematics and Modeling*. 2014. V. 25. N 3. P. 365–380. doi: 10.1007/s10598-014-9233-2
4. Королев А.Н., Гарцуев А.И., Полищук Г.С., Трегул В.П. Метрологические исследования и выбор формы оптической марки в цифровых измерительных системах // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77. № 6. С. 25–27.
5. Королев А.Н., Лукин А.Я., Полищук Г.С. Новая концепция

References

1. Trujillo-Pino A., Krissian K., Aleman-Flores M., Santana-Cedres D. Accurate subpixel edge location based on partial area effect. *Image and Vision Computing*, 2013, vol. 31, no. 1, pp. 72–90. doi: 10.1016/j.imavis.2012.10.005
2. Bouchara F., Ramdani S. Subpixel edge refinement using deformable models. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, vol. 26, no. 4, pp. 820–832. doi: 10.1364/josaa.26.000820
3. Mizotin M.M. Subpixel edge detection in the problem of determining the surface tension from an axisymmetric drop profile. *Computational Mathematics and Modeling*, 2014, vol. 25, no. 3, pp. 365–380. doi: 10.1007/s10598-014-9233-2
4. Korolev A.N., Gartsuev A.I., Polishchuk G.S., Tregub V.P. Metrological studies and the choice of the shape of an optical mark in digital measuring systems. *Journal of Optical Technology*, 2010, vol. 77, no. 6, pp. 370–372.

- измерения угла. Модельные и экспериментальные исследования // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 6. С. 52–58.
6. Goodman J.W. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, 2005. 491 p.
 7. de Berg M., van Kreveld M., Overmars M., Schwarzkopf O. *Computational Geometry. Algorithms and Application*. 2nd ed. Springer-Verlag, 2000. 367 p.
 8. Gustafsson M.G.L. Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy // *Journal of Microscopy*. 2000. V. 198. N 2. P. 82–87. doi: 10.1046/j.1365-2818.2000.00710.x
 9. Иночкин Ф.М., Круглов С.К., Бронштейн И.Г. Преодоление дифракционного предела при оптических измерениях границ объектов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1. С. 96–105. doi: 10.15217/issn1684-8853.2018.1.96
 10. Fabijansk A. Gaussian-based approach to subpixel detection of blurred and unsharp edges // *Proc. 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. Warsaw, 2014. P. 641–650. doi: 10.15439/2014f136
 5. Korolev A.N., Lukin A.Ya., Polishchuk G.S. New concept of angular measurement. Model and experimental studies. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 6, pp. 352–356. doi: 10.1364/JOT.79.000352
 6. Goodman J.W. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, 2005, 491 p.
 7. de Berg M., van Kreveld M., Overmars M., Schwarzkopf O. *Computational Geometry. Algorithms and Application*. 2nd ed. Springer-Verlag, 2000, 367 p.
 8. Gustafsson M.G.L. Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy. *Journal of Microscopy*, 2000, vol. 198, no. 2, pp. 82–87. doi: 10.1046/j.1365-2818.2000.00710.x
 9. Inochkin F.M., Kruglov S.K., Bronshtein I.G. Breaking the diffraction limit in optical edge estimation problem. *Information and Control Systems*, 2018, no. 1, pp. 96–105. (in Russian) doi: 10.15217/issn1684-8853.2018.1.96
 10. Fabijansk A. Gaussian-based approach to subpixel detection of blurred and unsharp edges. *Proc. 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. Warsaw, 2014, pp. 641–650. doi: 10.15439/2014f136

Авторы

Иночкин Федор Михайлович – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, Scopus ID: 57188665365, ORCID ID: 0000-0002-2155-0736, fedor.inochkin@gmail.com

Белашенков Николай Романович – кандидат физико-математических наук, начальник департамента научных исследований и разработок, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6701468198, ORCID ID: 0000-0002-9889-1117, belashenkov@gmail.com

Authors

Fedor M. Inochkin – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Assistant, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, Scopus ID: 57188665365, ORCID ID: 0000-0002-2155-0736, fedor.inochkin@gmail.com

Nickolay R. Belashenkov – PhD, Head of R&D Department, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6701468198, ORCID ID: 0000-0002-9889-1117, belashenkov@gmail.com