

Научная статья

УДК 681.2.08

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-35-40>

Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра

Олег Владимирович Захаров^{1✉}, Александр Григорьевич Лаптев², Валерий Григорьевич Лысенко³, Екатерина Александровна Милованова⁴, Наталья Арменаковна Табачникова⁵

¹ Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия, zov20@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6186-6375>

² ООО «Лапик», Саратов, Россия, info@lapic.ru

^{3, 4, 5} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия,

³lysenko@vniims.ru, ⁴milovanova@vniims.ru, ⁵tobachnikova@vniims.ru

Аннотация. Рассмотрена особенность применения шестиосевых координатно-измерительных машин «Лапик» для измерения шероховатости сложных поверхностей. Данная особенность состоит в неравномерной дискретизации по координатным осям. Для учёта неравномерной дискретизации в качестве элемента прикладного программного обеспечения предложен дискретный алгоритм морфологической фильтрации. В дискретном алгоритме первичный профиль шероховатости подвергался кусочно-линейной интерполяции, дисковый структурный элемент описывался непрерывно, что позволило уменьшить погрешность определения центра дискового элемента при морфологических операциях. Точность алгоритма проверена на реальных и модельных примерах. Полученная погрешность фильтрации при измерении параметров шероховатости составила около 3 %. Проведено сравнение производительностей предложенного, базового дискретного и альфа-формы алгоритмов. Показано преимущество разработанного алгоритма при высокой неравномерности исходных данных. Время фильтрации для 10000 точек профиля шероховатости не превышает 0,05 с.

Ключевые слова: шероховатость, фильтрация профиля, морфологический фильтр, дискретный алгоритм, кусочно-линейная интерполяция

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01269).

Для цитирования: Захаров О. В., Лаптев А. Г., Лысенко В. Г., Милованова Е. А., Табачникова Н. А. Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 35-40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-35-40>

Discrete algorithm for disk morphological filter based on piecewise linear interpolation

Oleg V. Zakharov^{1✉}, Alexander G. Laptev², Valery G. Lysenko³, Ekaterina A. Milovanova⁴, Natalia A. Tabachnikova⁵

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia, zov20@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6186-6375>

² LLC "Lapik", Saratov, Russia, info@lapic.ru

^{3, 4, 5} Russian Research Institute of Metrological Service, Moscow, Russia, ³lysenko@vniims.ru, ⁴milovanova@vniims.ru,

⁵tobachnikova@vniims.ru

Abstract. The use of six-axis coordinate measuring machines "Lapik" for measuring the roughness of complex surfaces has a feature that consists in non-uniform discretization along the coordinate axes. One of the elements of the applied software should be a morphological filtering algorithm that takes into account this specificity. Compared to linear and regression Gaussian filters, morphological filters have a number of advantages. The main ones are the absence of edge effects and the not need to first apply a form filter. The well-known basic discrete algorithm for the morphological filter provides for a constant profile discretization step. Another limitation is related to the error from the discretization of the structural element. This article presents a discrete algorithm that takes into account the indicated features of measurement on coordinate measuring machines. To do this, the primary roughness profile is subjected to piecewise linear interpolation, and the disk structural element is described continuously. This makes it possible to determine the center of the disk with less error during morphological operations. Checking the accuracy of the algorithm on real and model examples showed that the filtering error in measuring the parameters Ra and Rq is about 3 %. The advantage of the developed algorithm is realized with a high unevenness of the initial data. The comparison of the performance of the proposed algorithm with the known ones showed its sufficient efficiency. The calculation time for 10000 points of the roughness profile does not exceed 0.05 sec.

Keywords: roughness, profile filtering, morphological filter, numerical algorithm, piecewise linear interpolation

Financial Support: this work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-29-01269).

© Захаров О. В., Лаптев А. Г., Лысенко В. Г., Милованова Е. А., Табачникова Н. А., 2022

Введение. Развитие координатно-измерительных машин (КИМ) позволило ведущим мировым фирмам Carl Zeiss (Германия) и Mitutoyo (Япония) дополнить их возможности измерением шероховатости. Для этого на КИМ устанавливают датчики шероховатости ZEISS ROTOS или SURFTEST, которые перемещают за счёт линейных приводов по трём координатам в заданную позицию. Затем датчики шероховатости перемещают по прямой или наклонной линии на измеряемой поверхности. Конкурентный уровень отечественных КИМ поддержала фирма «Лапик» (Саратов), которая провела исследования по возможности измерения шероховатости. Для этого предложено перемещать датчик касания с щупом с использованием шести параллельных приводов КИМ. Радиус щупа 10 мкм, дискретность перемещения 0,5 мкм, чувствительность датчика 0,01 мкм. Данные параметры позволяют измерять шероховатость контактным методом на сложных поверхностях резьбы, зубчатых колес, лопатках турбин. Специфика измерения на шестиосевой КИМ «Лапик» обуславливает получение координат поверхности с неравномерными шагами по координатным осям [1, 2]: погрешности механических перемещений и внешних воздействий отслеживаются и компенсируются системой шести лазерных интерферометров. В результате получают более точные координаты поверхности, но с неравномерными шагами дискретизации по координатным осям. Однако стало затруднительно применять стандартные алгоритмы фильтрации, потребовалась разработка нового алгоритма.

Цель работы – разработать дискретный алгоритм морфологической фильтрации, в котором с помощью кусочно-линейной интерполяции учтена неравномерность шага дискретизации.

Методы фильтрации. Фильтрация представляет собой первый и обязательный этап обработки сигнала при измерении структуры поверхности согласно ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014¹ и ГОСТ Р ИСО 4287-2014². Профиль шероховатости получается из первичного профиля путём подавления длинноволновой компоненты при помощи профильного фильтра. Расчёт параметров шероховатости традиционно осуществляется от средней линии профиля, полученного в результате модификации первичного профиля с помощью фильтра.

Методы фильтрации регламентируют международные стандарты серии ISO 16610, объединённые под общим названием «Геометрические характеристики изделий. Фильтрация». Эта фундаментальная серия стандартов позволяет выбрать наиболее подходящий фильтр под конкретные условия. Согласно матрице фильтров по ГОСТ Р 8.895-2015³, профильные фильтры разделены на три группы: линейные, робастные, морфологические.

Основой морфологических фильтров можно считать механическую фильтрацию и метод Motif (ISO 12085:1996⁴), который включен в новый стандарт ISO 21920-2:2021⁵. Морфологические фильтры изначально ориентированы на анализ функциональных свойств поверхностей [3]. При морфологической фильтрации поверхностей проще описывать их трибологические свойства – скольжение, прилипание, герметизацию [4]. Поэтому морфологические фильтры эффективно дополняют линейные фильтры.

В машиностроении все большее применение получают multifunctionальные поверхности и изделия аддитивного производства. В первом случае поверхности содержат два и более уровня шероховатости. Например, поверхности после хонингования имеют протяжённые плато и узкие глубокие впадины. Во втором случае при достаточно высоком уровне шероховатости имеются особенности структуры. Традиционное использование линейного и робастного регрессионного фильтров Гаусса в этом случае имеет недостатки [5–7]. Для линейного фильтра Гаусса характерны краевые эффекты, в результате чего отсекается 20–60 % данных измерений. Для регрессионного фильтра Гаусса предварительно требуется удаление компоненты формы из профиля. Известен целый ряд исследований, показавших высокую эффективность морфологических фильтров для анализа multifunctionальных поверхностей [8], сложнопрофильных поверхностей [9], изделий аддитивного производства [10, 11].

Принципы построения морфологических фильтров.

В основе морфологических фильтров лежит математическая морфология. Первоначально математическая морфология развивалась в области обработки изображений, затем она была внедрена в метрологию поверхности. Существуют две основные (наращивание и эрозия) и две вторичные (замыкание и размыкание) морфологические операции. Операторы замыкания и размыкания представляют собой простые морфологические фильтры. Для проведения операций морфологической фильтрации необходимо выбрать структурный элемент. Согласно ISO 16610-41:2015⁶ используются структурные элементы в виде диска (вариант по умолчанию) или горизонтального сегмента прямой. Индексом вложения является размер структурного элемента – радиус диска.

В операции наращивания начало структурного элемента помещают в каждую точку первичного профиля и размер элемента добавляют к координате профиля. Результат наращивания вычисляется путём перемещения структурного элемента по всем точкам профиля. В операции эрозии координата точки структурного элемента вычитается из профиля. Операция замыкания представляет собой последовательный

¹ ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности.

² ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности.

³ ГОСТ Р 8.895-2015. Геометрические характеристики изделий. Фильтрация. Часть 1. Обзор и основные понятия.

⁴ ISO 12085:1996. Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Motif parameters.

⁵ ISO 21920-2:2021. Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.

⁶ ISO 16610-41:2015. Geometrical product specifications (GPS). Filtration. Part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters.

двухэтапный процесс наращивания и эрозии. Операция размыкания также осуществляется в два этапа, но вначале выполняется операция эрозии, а затем наращивания. В [12] показано, что замыкающий фильтр подавляет впадины на профиле размером меньше радиуса диска, в то время как пики остаются неизменными. Размыкающий фильтр подавляет пики на профиле, размер которых меньше радиуса диска, но сохраняет впадины.

Основополагающей работой по морфологическим фильтрам стала статья [13]. В ней было показано, что разделение шероховатости, волнистости и погрешности формы контролируется радиусом окружности качения в Е-системе измерения. Дискретный алгоритм и программа MATLAB, представленные в [14], легли в основу стандарта ISO 16610-41:2015. Основная идея алгоритмов наращивания и эрозии заключалась в размещении начала структурного элемента в каждой точке исходных данных и суммировании их координат. Экстремальные значения в каждой точке выборки собирались и представлялись в качестве выходных данных. Особенностями алгоритма стало то, что структурный элемент благодаря симметричности описывался только в первом квадранте, а при операциях наращивания и эрозии учитывались конечные эффекты. В [15] было предложено использовать два структурных элемента разного радиуса. В итоге результирующий профиль подавляет все глубокие впадины и позволяет избежать дрейфа в сторону изолированных пиков. В [16] был предложен алгоритм альфа-формы, основанный на триангуляции. Альфа-форма представляет собой выпуклую оболочку множества точек, из которой извлекаются грани в виде набора симплексов. После принятия стандарта ISO 16610-41:2015 дискретный алгоритм был реализован в отечественном программном обеспечении [17].

Основное ограничение известных дискретных алгоритмов для морфологической фильтрации заключается в исходном задании равномерного шага. Только в этом случае дискретные отсчёты для профиля и структурного элемента могут быть сопоставлены. Для традиционных профилометров равномерный шаг реализуется за счёт перемещения щупа относительно измеряемой поверхности с постоянной скоростью

и снятия данных через равные интервалы времени. Однако введённое ограничение затрудняет использование таких алгоритмов для данных, полученных с помощью КИМ.

Любому дискретному алгоритму свойственна погрешность аппроксимации. Погрешность измерения увеличивается с увеличением шага дискретизации и уменьшением длины профиля [18]. Можно предположить, что погрешность измерения увеличивается с ростом неравномерности шага дискретизации. Поэтому дискретное представление структурного элемента, а также допущение о равенстве значений дискретизации профиля и структурного элемента способствуют увеличению погрешности алгоритма. В этом случае возникает погрешность Δ_1 определения положения структурного элемента (центра нижней половины диска) (рис. 1). Неравномерность шага дискретизации также приводит к увеличенной погрешности Δ_2 на краях профиля.

Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции (ДАКЛ). Авторами настоящей статьи предложен алгоритм, в котором исходные дискретные данные профиля кусочно-линейно интерполируют, а структурный элемент описывают непрерывно. Кусочно-линейная интерполяция по сравнению с кусочно-постоянной обеспечивает меньшую погрешность определения параметров шероховатости [18]. Более гладкая кривая без разрыва первой производной получается при использовании квадратичной интерполяции и сплайнов. Однако сложность решения системы уравнений делает их использование нецелесообразным для интерполяции, а также нелинейного уравнения контакта. Как будет показано далее, для кусочно-линейной интерполяции удалось получить алгебраические выражения для расчёта точки контакта. Предлагаемый подход позволяет найти точки контакта структурного элемента и профиля как в дискретных точках исходных данных, так и между ними. Точки контакта не привязаны к шагу дискретизации исходных данных и не требуют их равномерного расположения по координатной оси. Наиболее применяемым является морфологический фильтр, построенный на диске. Поэтому последующий алгоритм приведён для структурного элемента в виде диска.

Аналитическое описание ДАКЛ сводится к следующему (рис. 2). Исходные данные профиля заданы матрицей координат

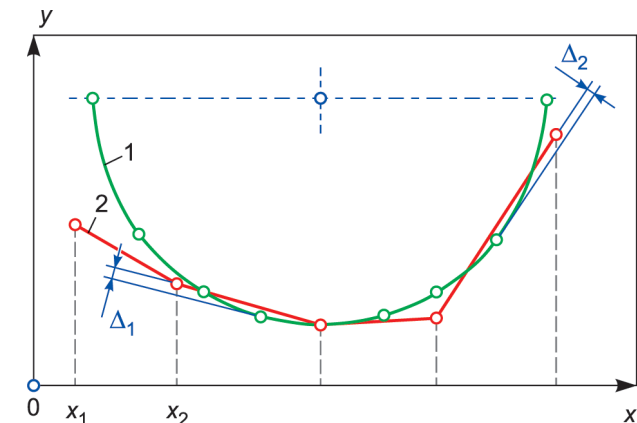


Рис. 1. Погрешность дискретизации: 1 – структурный элемент; 2 – профиль

Fig. 1. Discretization error: 1 – structural element; 2 – profile

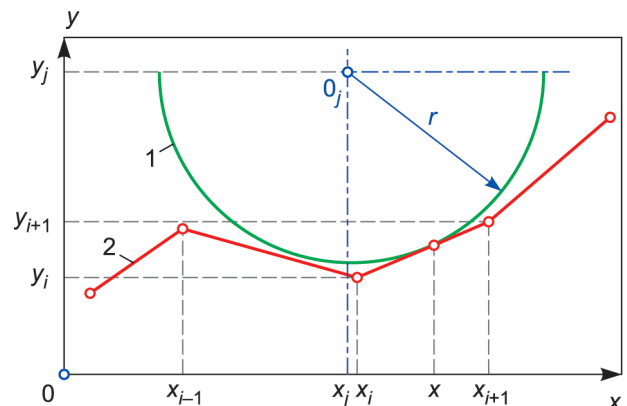


Рис. 2. Определение точки контакта; 1, 2 – те же, что на рис. 1

Fig. 2. Determining the contact point; 1, 2 are the same as in Fig. 1

(x_j, y_j) . Кусочно-линейное описание для каждого j -го участка описывается уравнением

$$y_1 = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} x + y_i - \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} x_i, \quad (1)$$

где x – координата точки контакта.

Структурный элемент в виде нижней половины круга представлен уравнением

$$y_2 = y_j - \sqrt{r^2 - (x - x_j)^2}, \quad (2)$$

где r – радиус круга; x_j, y_j – координаты центра круга.

Для определения точки контакта использовано условие экстремума разности функций y_1, y_2 . В результате преобразований получено выражение для расчёта координаты x точки контакта круга и отрезка прямой

$$x = x_j + ar / \sqrt{1 + a^2}, \quad (3)$$

где $a = (y_{i+1} - y_i) / (x_{i+1} - x_i)$.

Знак «+» в (3) соответствует первому октанту для круга. Координата y_j найдена путём подстановки координаты x последовательно в уравнения (1), (2), так как точка контакта одновременно принадлежит окружности и отрезку прямой.

Разработанный ДАКЛ реализован в программе MATLAB и включает основной файл и две файл-функции. В файл-функциях описаны операции наращивания и эрозии. В основном файле выполняются операции замыкания и размыкания. Необходимость в отдельном описании структурного элемента в файл-функции отсутствует. Для операции наращивания по аналогии с алгоритмом [14] реализуется два вложенных цикла. Отличие заключается в том, что цикл по переменной j выполняется не по дискретным точкам, а по интервалам. Во внешнем цикле структурный элемент последовательно размещается в каждой исходной точке x_j . Во внутреннем цикле определяются

точки контакта для отрезков прямых, находящихся в пределах проекции дуги окружности на ось x . Для этого предварительно вычисляется число отрезков и производится соответствующая индексация внутри цикла. Максимальные значения в каждой исходной точке являются выходными данными. При эрозии изменяется знак входных данных, выполняется операция наращивания, а затем изменяется знак выходных данных.

Достоинство разработанного ДАКЛ заключается в отсутствии сложных математических операций. Основными вычислительными операциями являются сложение, вычитание, умножение и нахождение минимума-максимума.

Анализ погрешности ДАКЛ. Эффективность разработанного алгоритма морфологической фильтрации проверена на реальных и модельных данных. Для анализа погрешности использована композиционная модель шероховатости, которая по аналогии с [19] составлена по принципу суперпозиции. Модель содержит три основные составляющие: шероховатость (исходная модель); волнистость; погрешность формы. Композиционная модель описана уравнением

$$\Delta(y) = \Delta_1(m, \sigma) + \Delta_2(a, t, \varphi) + \Delta_3(y). \quad (4)$$

В модели (4) шероховатость (гауссовая составляющая) Δ_1 представляет собой нормальный случайный процесс с средним значением m и стандартным отклонением σ ; волнистость Δ_2 описывается косинусоидой с амплитудой a , периодом t и начальной фазой φ ; погрешность формы Δ_3 зависит от номинальной формы и заданного сечения поверхности, в простейшем случае погрешность формы представляется наклонной прямой.

Пример модели шероховатости представлен на рис. 3. Гауссовая составляющая (1) получена с использованием стандартной функции с $m=0$ и $\sigma=0,002$ мм. Волнистость задана косинусоидой с параметрами $a=0,002$ мм; $t=0,42$ мм; $\varphi=0,32$ мм (3). Погрешность формы представлена прямой с углом наклона $0,3^\circ$ (4). Композиционная модель шероховатости длиной 0,5 мм представлена кривой 2. Для дискретного представления использовано 200 точек профиля. Неравномерность шага смоделирована в виде разности детерминированного шага 0,005 мм и равномерной случайной величины с размахом 0,004 мм. Дискретность по сути является элементом фильтрации и должна соответствовать определенным значениям параметров шероховатости Ra , Sm и базовой длине. Для иллюстрации модельного примера шаг был увеличен для получения более наглядной картины.

На рис. 4 представлена фильтрация композиционной модели 1 шероховатости длиной 0,5 мм по разработанному алгоритму – операции наращивания (2), эрозии (3), замыкания (4) и размыкания (5) (рис. 4, а). Индекс вложения должен быть больше радиуса измерительного щупа и выбран из логарифмического ряда. Поэтому использован диск радиусом 200 мкм. На рис. 4, б приведены профили шероховатости, полученные с помощью соответствующих фильтров.

Расчёт параметров шероховатости по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 выполнен по разработанной в [20] программе. В исходной модели шероховатости впадины и выступы распределены

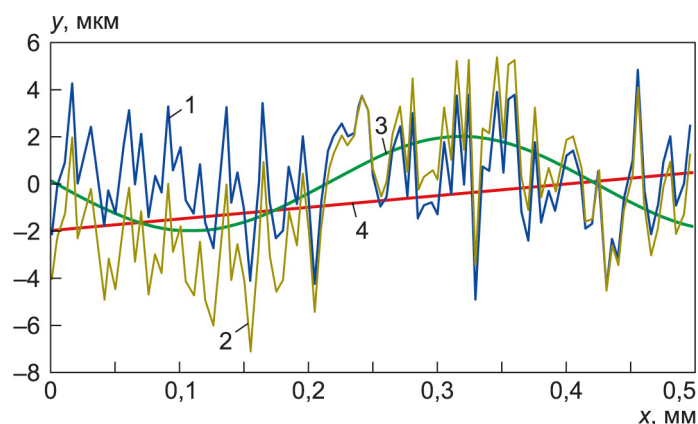


Рис. 3. Модель профиля шероховатости: гауссовая составляющая (1); композиционная модель шероховатости длиной 0,5 мм (2); волнистость (3); погрешность формы (4)

Fig. 3. Roughness profile model: Gaussian component (1); compositional model of roughness 0.5 mm (2); waviness (3); form error (4)

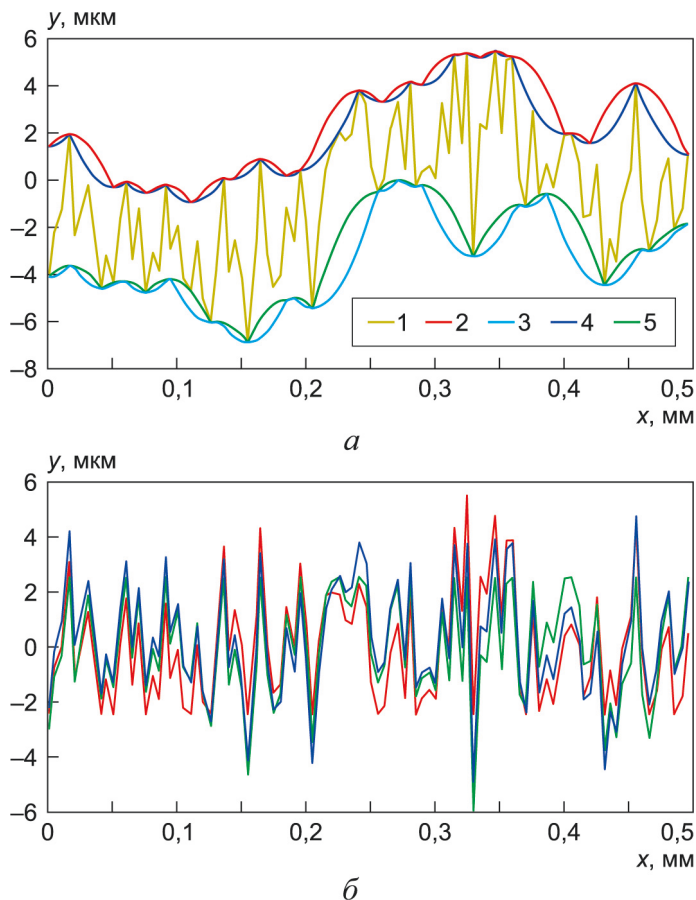


Рис. 4. Морфологическая фильтрация композиционной модели 1 шероховатости длиной 0,5 мм по разработанному алгоритму: а – операции наращивания (2), эрозии (3), замыкания (4) и размыкания (5); б – профили шероховатости, полученные с помощью соответствующих фильтров (2–5)

Fig. 4. Morphological filtering of the compositional model 1 with roughness of 0.5 mm according to the developed algorithm: а – operations of dilatation (2), erosion (3), closing (4) and opening (5); б – roughness profiles, obtained using the suitable filters (2–5)

равномерно ($Rsk=0,37$; $Rv \approx Rp$). Композиционная модель шероховатости имеет преимущественные впадины ($Rsk=-0,48$; $Rv > Rp$). Замыкающий и размыкающий морфологические фильтры позволяют получить параметр шероховатости Ra с погрешностью 2,5 и 1,5 % соответственно. Данный результат был получен без применения фильтра формы.

Для сравнения проведены численные эксперименты для 10 моделей шероховатости по трём алгоритмам: базовый [14], альфа-формы [16] и предложенный ДАКЛ. Использовалась композиционная модель шероховатости (4) с небольшой вариацией значений параметров относительно модели рис. 3. Для определения погрешности алгоритмов выбраны высотные параметры: арифметическое среднее отклонение Ra ; среднее квадратическое отклонение Rq . Параметры Ra , Rq получены усреднением данных и обладают статистической устойчивостью. Результаты численных экспериментов представлены в табл. 1. Для базового алгоритма [14] использованы только модели шероховатости

Таблица 1

Погрешности алгоритмов, %

Алгоритм	Равномерный шаг		Неравномерный шаг	
	Ra	Rq	Ra	Rq
Базовый	3,1	3,2	–	–
Альфа-формы	3,0	3,1	4,2	4,5
ДАКЛ	2,9	2,9	3,0	3,1

Таблица 2

Время работы алгоритмов, с, для различного числа точек профиля

Алгоритм	1000	2500	10000
Базовый	0,0016	0,0101	0,0438
Альфа-формы	0,0021	0,0103	0,0506
ДАКЛ	0,0019	0,0104	0,0464

с равномерным шагом, а для предложенного ДАКЛ и алгоритма альфа-формы [16] и как с равномерным, так и с неравномерным шагом по оси x .

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы. Для равномерного шага точек профиля шероховатости все алгоритмы показали примерно одинаковую погрешность около 3 %. Для параметра Rq характерна несколько большая погрешность, чем для параметра Ra . При неравномерном шаге профиля шероховатости погрешность предложенного алгоритма увеличивается незначительно, а алгоритма [16] – до 1,5 раза. Таким образом, предложенный алгоритм может быть использован как для равномерного, так и неравномерного шага дискретизации профиля шероховатости.

Анализ производительности ДАКЛ. Одним из важных свойств алгоритма является производительность, которую можно оценить в виде усреднённого времени расчёта для входных данных различного объёма. Практические методы программирования, используемые для реализации алгоритмов, также влияют на их реальную производительность. Алгоритмы с эффективными структурами данных и операциями с памятью обычно имеют более высокую производительность. Например, метод альфа-формы требует больших затрат на поддержку структуры данных по сравнению с другими алгоритмами [21].

Для проверки производительности алгоритмов проведены компьютерные эксперименты с числом точек профиля от 1000 до 10000. Использованы морфологический замыкающий и размыкающий фильтры с индексами вложения 2 и 10 мкм. Существенной разницы времён расчёта для двух радиусов не выявлено. Морфологическая фильтрация выполнена по базовому алгоритму [14], предложенному ДАКЛ, и алгоритму альфа-формы [16], реализованным в программе MATLAB и протестированным на компьютере с процессором Intel Core i3-6006U 1,99 ГГц и 4 ГБ ОЗУ. Работа алгоритмов повторена 10 раз и затем данные усреднены. Производительность (здесь – время работы) алгоритмов представлена в табл. 2.

Согласно табл. 2 производительность предложенного ДАКЛ сопоставима с производительностью двух других алгоритмов,

незначительно уступая лишь базовому алгоритму [14]. Время работы алгоритма альфа-формы согласуются с данными [21]. В целом все алгоритмы показали близкое время расчётов. Время расчётов по предложенному ДАКЛ не превышает 0,05 с при 10000 точек профиля, достаточных для большинства практических задач измерения шероховатости.

Заключение. Разработанный дискретный алгоритм для морфологического фильтра с дисковым структурным элементом реализует кусочно-линейную интерполяцию первичного профиля шероховатости и позволяет анализировать неравномерный шаг дискретизации профиля. Для нахождения центра диска использовано условие экстремума разности функций профиля и окружности, что привело к уменьшению погрешности определения центра диска. Погрешность разработанного ДАКЛ для композиционной модели шероховатости составляет около 3 % по параметрам R_a , R_q . Проведённое сравнение производительностей предложенного ДАКЛ с базовым алгоритмом и алгоритмом альфа-формы показало сопоставимый результат по времени. Поэтому ДАКЛ можно рекомендовать как для равномерного, так и неравномерного шага дискретизации профиля шероховатости. Основной практический результат – возможность применения ДАКЛ для шестиосевых координатно-измерительных машин.

Список источников / References

1. А. с. СССР 1296832 МПК G01B 1/28. Способ контроля формы изделий на координатно-измерительной машине / А. Г. Лаптев, С. Г. Бойченко, В. Д. Семенов, А. Г. Маринин, О. Д. Лосин. Опубл. 15.03.1987. [Patent USSR 1296832 G01B 1/28, Laptev A. G., Boichenko S. G., Semenov V. D., Marinin A. G., Losin O. D., Published 03/15/1987].
2. Kochetkov A. V., Troshin A. A., Zakharov O. V., *Defect and Diffusion Forum*, 2021, vol. 410, pp. 872–877. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.872>
3. Lou S., Jiang X., Scott P. J., *Measurement*, 2013, vol. 46, pp. 993–1001. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.10.001>
4. Dietzsch M., Gerlach M., Groger S., *Wear*, 2008, vol. 264, pp. 411–415. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.042>
5. Lou S., Jiang X., Scott P. J., *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 483, 012020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/483/1/012020>
6. Podulka P., *Metrology and Measurement Systems*, 2020, vol. 27, pp. 243–263. <https://doi.org/10.24425/mms.2020.132772>
7. Порошин В. В., Богомолов Д. Ю., Лысенко В. Г. Исследование погрешности фильтрации текстуры поверхности пространственным фильтром Гаусса // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 19–23. [Poroshin V. V., Bogomolov D. Y., Lysenko V. G., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, pp. 777–784. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1270-8>].
8. Pawlus P., Reizer R., Wiecezowski M., *Precision Engineering*, 2021, vol. 72, pp. 807–822. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.08.001>
9. Bolotov M. A., Pechenin V. A., Murzin S. P., *Computer Optics*, 2016, vol. 40, pp. 360–369. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-3-360-369>
10. Leach R. K., Bourell D., Carmignato S., Donmez A., Senin N., Dewulf W., *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, pp. 677–700. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.004>
11. Okunkova A., Volosova M., Peretyagin P., Zhirnov I., Podrabinnik P., Fedorov S. V., Gusarov A., *Advanced Materials Letters*, 2016, vol. 7, pp. 111–115. <https://doi.org/10.5185/amlett.2016.6143>
12. Lou S., Jiang X., Scott P. J., *Measurement*, 2013, vol. 46, pp. 1002–1008. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.09.015>
13. Radhakrishnan V., *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1972, vol. 12, pp. 151–159. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(72\)90030-3](https://doi.org/10.1016/0020-7357(72)90030-3)
14. Srinivasan V., Discrete morphological filters for metrology, *Proceedings of the sixth IMEKO ISMQC symposium on metrology for quality control in production*, TU Wein, Austria, September 8–10, 1998.
15. Kumar J., Shunmugam M. S., *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46, pp. 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.025>
16. Jiang X., Lou S., Scott P. J., *Measurement Science and Technology*, 2012, vol. 23, 015003. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/1/015003>
17. Марков Б. Н., Меликова О. Н., Шулепов А. В. Алгоритм построения морфологического дискового фильтра для анализа шероховатости поверхности // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 30–33. [Markov B. N., Melikova O. N., Shulepov A. V., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, pp. 451–456. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1216-1>].
18. Лукьянов В. С., Лысенко В. Г. Исследование влияния аппроксимации на погрешность измерения параметров шероховатости дискретным методом // Измерительная техника. 1982. № 2. С. 16–19. [Luk'yanov V. S., Lysenko V. G., *Measurement Techniques*, 1982, vol. 25, pp. 106–110. <https://doi.org/10.1007/BF00828988>].
19. Порошин В. В., Богомолов Д. Ю., Порошин О. В., Лысенко В. Г. Применение морфологической пространственной фильтрации неровностей поверхности для трёхмерной параметрической оценки текстуры // Метрология. 2016. № 2. С. 3–14. [Poroshin V. V., Bogomolov D. Y., Poroshin O. V., Lysenko V. G., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, pp. 637–643. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1023-0>].
20. Zakharchenko M. Yu., Kochetkov A. V., Salov P. M., Zakharov O. V., *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pp. 1866–1870. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.488>
21. Lou S., Jiang X., Scott P. J., *Precision Engineering*, 2012, vol. 36, pp. 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.01.003>

Статья поступила в редакцию 21.06.2022; одобрена после рецензирования 30.06.2022; принята к публикации 01.07.2022.
The article was submitted 21.06.2022; approved after reviewing 30.06.2022; accepted for publication 01.07.2022.