

Предлагаем вниманию читателей продолжение подборки статей к 85-летию Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»). Начало подборки см. журнал «Измерительная техника» № 7, 2015 г.

681.2

Двухмерные фильтры изображения шероховатости поверхности

Б. Н. МАРКОВ, А. В. ШУЛЕПОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: bnmarkov@rambler.ru, avshul@yandex.ru

Представлены алгоритмы фильтрации трехмерного изображения рельефа шероховатой поверхности, в частности робастные алгоритмы, позволяющие исключить из результатов измерений случайные выбросы и исследовать особенности поверхностей со стратифицированными свойствами. Показаны возможности реализации робастной процедуры применительно к фильтру Гаусса. Рассмотрены особенности использования двумерного регрессионного фильтра.

Ключевые слова: многофункциональная поверхность, робастная фильтрация, регрессионные фильтры.

The algorithms for three-dimensional surface roughness relief filtration, including robust algorithms enabling the removal of random noises from measurement results and the study of features surfaces with stratified properties are presented. The possibilities of implementation of robust procedure applied to Gaussian filter are shown. The peculiarities of two-dimensional regression filter usage are considered.

Key words: surface relief, multifunction surface, robust filtering, regression filters.

Развитие методов и средств измерений 3D-параметров шероховатой поверхности деталей машин требует применения соответствующих пространственных фильтров [1—4]. При этом в качестве коротко- и длинноволновых фильтров (L- и S-фильтров) используют двухмерные аналоги линейных и регрессионных фильтров Гаусса. При анализе шероховатости с полезными глубокими рисками типа мультифункциональных (MUFU) поверхностей возникает необходимость разработки робастных фильтров, позволяющих получить срединную поверхность, не учитывающую влияния резко выделяющихся впадин.

Исходные данные при этом анализе заключены в матрице $H = \{h_{k,s}\}$ изображения поверхности. Элементы $h_{k,s}$ матрицы идентичны высотам соответствующих точек поверхности над некоторой средней плоскостью, задаваемой настройками средства измерений (СИ). Номера точек упорядочены по осям координат $k = 0, \dots, K-1$; $s = 0, \dots, S-1$, причем обычно $K = S$. Шаги дискретизации по осям координат равны: $x_d = y_d$.

Весовая функция длинноволнового фильтра (фильтра нижних пространственных частот) определяется через функцию Гаусса:

$$w(x, y, \lambda_{cx}, \lambda_{cy}) = \frac{1}{\alpha^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}} \exp \left[-\frac{\pi}{\alpha^2} \left(\frac{x^2}{\lambda_{cx}^2} + \frac{y^2}{\lambda_{cy}^2} \right) \right],$$

где x, y — координаты по осям изображения поверхности; $\lambda_{cx}, \lambda_{cy}$ — отсечки шага (cut off) по двум направлениям, т. е. длины волн изображения, пропускаемые через фильтр с коэффициентом передачи, равным 0,5; $\alpha = \sqrt{\pi^{-1} \ln 2} = 0,4697$.

Обычно можно принять $\lambda_{cx} = \lambda_{cy} = \lambda_c$. Тогда выражение для весовой функции фильтра упрощается:

$$w(x, y, \lambda_c) = \frac{1}{\alpha^2 \lambda_c^2} \exp \left[-\frac{\pi}{\alpha^2} \left(\frac{x^2 + y^2}{\lambda_c^2} \right) \right].$$

При анализе поверхностной шероховатости [1] предложено использовать широкий диапазон отсечек шага: 0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 0,8; 1,0 мм. Этот ряд можно продолжить в сторону больших и меньших значений.

Результат длинноволновой фильтрации (S-фильтр в терминах [1]) реализуется в виде двухмерной свертки исходного рельефа, полученной при измерениях, и весовой функции. Предварительно весовую функцию следует перевести в цифровую форму, причем шаг дискретизации должен совпадать с шагами дискретизации рельефа.

Для примера на рис. 1, а представлена 3D-поверхность размером 2×2 мм, при шаге дискретизации по осям координат 0,01 мм это соответствует размеру 200×200 пикселей. Применение S-фильтра с отсечкой шага $\lambda_c = 0,01$ мм позволяет обнаружить и выделить S-поверхность, в данном случае волнистость поверхности как результат длинновол-

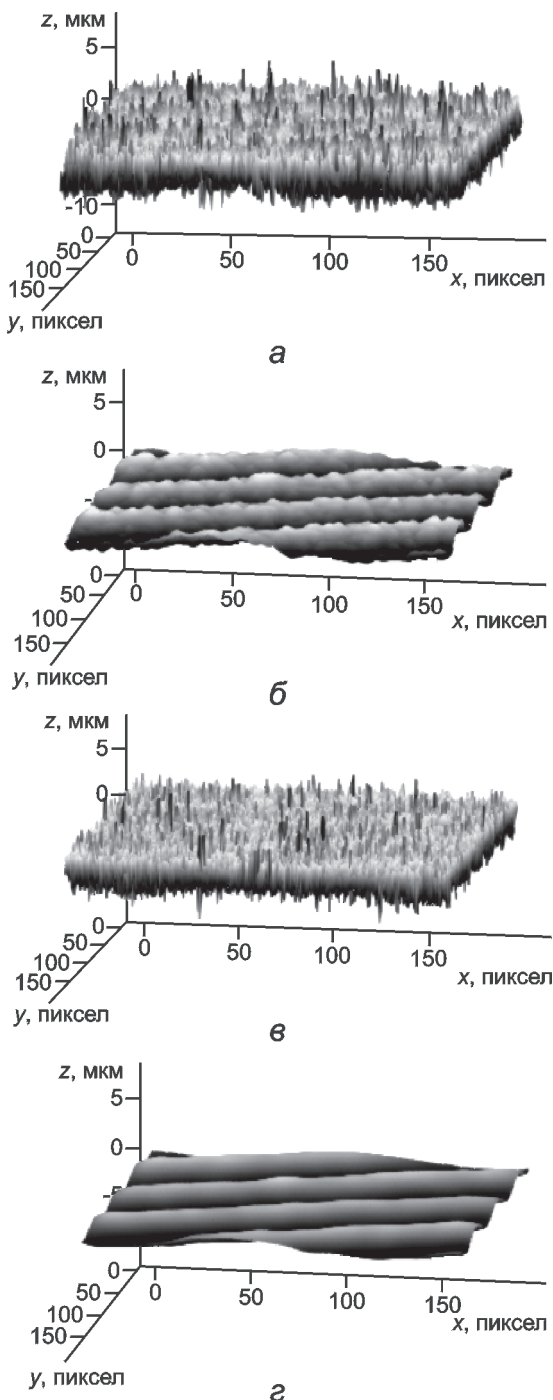


Рис. 1. Фильтрация изображения микрорельефа и образование срединной поверхности

новой фильтрации (рис. 1, б). Разность между исходной и S-поверхностью позволяет получить шероховатость (L -поверхность, рис. 1, в) уже без учета волнистости, которая подлелжит самостоятельному нормированию. При увеличении λ_c до 0,25 мм получаем срединную поверхность, от которой и следует отсчитывать значения шероховатости (рис. 1, г).

Специальные задачи фильтрации возникают при контроле MUFU-поверхностей. Такие поверхности обрабатывают методами плосковершинного шлифования, хонингования, и они имеют глубокие впадины, служащие резервуарами для

удержания смазки на сопряженных поверхностях, работающих, например, в условиях трения скольжения. При анализе таких поверхностей следует выделить два слоя. Один слой, получающийся путем исключения впадин, служит опорной поверхностью для сопряжения, характеристики которой в результате обработки опорной кривой (кривой Аббота), определяют нагрузочную способность поверхности. Другой слой — впадины, их характеристики — глубина и протяженность. Для разделения этих слоев следует использовать робастные фильтры, нечувствительные к выбросам, превышающим обычные для данной поверхности. Чтобы определить срединную поверхность микрорельефа можно использовать робастный фильтр Гаусса с последующей процедурой пренебрежения резкими выпадками. На рис. 2, а представлен микрорельеф той же поверхности, что и на рис. 1, но с рядом глубоких впадин. Фильтрация изображения поверхности при $\lambda_c = 0,25$ мм давала хорошие результаты (см. рис. 1, в). Однако при резко выделяющихся впадинах получается совершенно иной результат. Срединную поверхность (рис. 2, б), следующую за впадинами, уже нельзя использовать для анализа шероховатости опорной части.

Процедура робастной фильтрации начинается с вычисления модулей расхождений между аппликатами полученной срединной поверхности и исходного микрорельефа $r_n = |h_{k,s} - z_{k,s}|$ и нахождения их медианы. Медиана характеризует пороговое значение параметра $C = 4,4478 \text{ median}(r)$, которое входит в функцию Тьюки, определяющую мультипликативные поправки для проведения первой рекурсии:

$$\delta 1_{k,s} = \begin{cases} \left(1 - (r_{k,s}/C)^2\right)^2 & \text{при } |r_{k,s}| \leq C; \\ 0 & \text{при } |r_{k,s}| > C; \end{cases}$$

$$h \delta 1_{k,s} = h_{k,s} \delta 1_{k,s}.$$

Второе приближение к срединной поверхности получается путем двумерной свертки матрицы исправленных значений $h \delta 1_{k,s}$ с матрицей фильтра при той же отсечке шага. Число рекурсий оказывается не слишком большим.

В отдельных случаях, когда требуется подавить коротковолновые составляющие, но сохранить неискаженными пики или впадины поверхности, можно использовать двумерные аналоги регрессионных фильтров Гаусса второго порядка. Весовая функция такого фильтра приобретает вид

$$w(x, y, \lambda_c) = \frac{1}{\lambda_c^2} \left[\frac{3}{2} - \frac{\pi}{\beta} \frac{x^2 + y^2}{\lambda_c^2} \right] \exp \left[-\frac{\pi}{\beta} \frac{x^2 + y^2}{\lambda_c^2} \right],$$

где $\beta = 1 - W_{-1}[-(2e)^{-1}] = 1,678$; $W_{-1}(z)$ — функция Ламберта.

От множителя $\left[\frac{3}{2} - \frac{\pi}{\beta} \frac{(x^2 + y^2)}{\lambda_c^2} \right]$ зависит формирование

отрицательных участков весовой функции. Это обстоятельство делает длинноволновой фильтр менее чувствительным к пикам и впадинам поверхности. При длинноволновой фильтрации поверхностных неровностей с помощью обычного линейного фильтра Гаусса важный для исследователя пик был бы отфильтрован, поскольку он образуется коротковолновыми составляющими. Вычитая срединную поверхность из исходной, получаем картину шероховатости и ее параметры не только на опорной части, но и во впадинах. Регрессион-

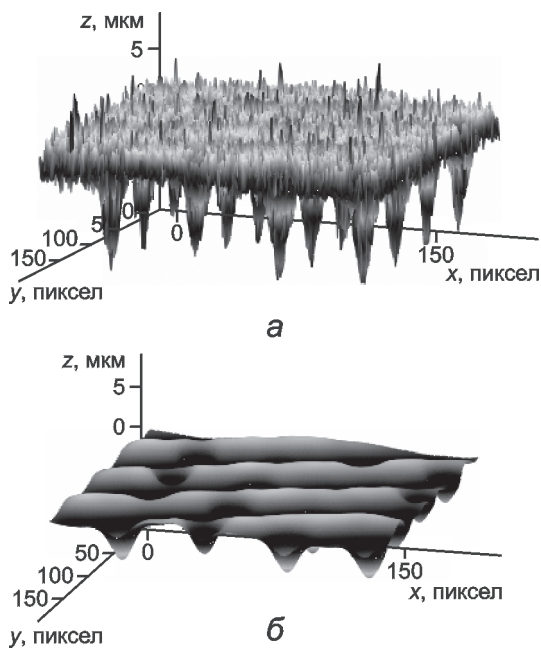


Рис. 2. Изображения микрорельефа MUFU-поверхности (а) и средняя поверхность (б)

ный фильтр Гаусса можно использовать и для робастной фильтрации микрорельефа. Процедура фильтрации остается неизменной, но отсечки шага следует выбирать несколько по-другому.

Таким образом, показаны возможности приложения двумерных аналогов традиционного и регрессионного фильтров Гаусса для обработки изображений микрорельефа поверхности с целью определения параметров пространственной шероховатости по [1].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на выполнение научных проектов № 9.2545.2014/К на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» (соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004).

Литература

1. ISO 25178-3:2012. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности: Ареал. Часть 3. Операторы характеристик.
2. Конов С. Г., Марков Б. Н. Алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений изображений измерительных меток // Метрология. 2011. № 3. С. 8—15.
3. Шулепов А. В., Холин И. Е., Герасимов С. Н., Дударов Д. А., Байковский А. Ю., Куликов В. А. Разработка измерительного комплекса для автоматизированной настройки инструментальных наладок для станков с ЧПУ // Измерительная техника. 2013. № 123. С. 32—35.
4. Лич Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности: Учебное издание. Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2012.

Дата принятия 27.05.2015 г.

621.9.08:62.503.57

Информационно-измерительные и управляющие системы силовых и виброакустических параметров

М. П. КОЗОЧКИН, А. Р. МАСЛОВ, А. Н. ПОРВАТОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: porvatov_artur@mail.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с созданием информационно-измерительных и управляющих систем на основе контроля акустозмиссионных и электромагнитных эффектов. Приведены экспериментальные данные о возможностях и границах применения этих эффектов при высокоскоростной обработке конструкционных материалов.

Ключевые слова: адаптивное управление, технологический процесс, высокоскоростная обработка, диагностика процесса резания, информационно-измерительная система, числовое программное управление.

The problems of creating information-measuring and control systems based on monitoring of acoustic emission and electromagnetic effects were considered. The experimental data describes possibilities and limits of these effects application in structural materials high-speed machining.

Key words: adaptive control, technological process, high-speed machining, cutting process diagnostics, information-measuring system, CNC.

Автоматическое поддержание работоспособности станочного оборудования в условиях минимального вмешательства оператора (безлюдная технология) невозможно без

широкого использования встроенных средств измерений [1—3], выполняющих сбор, обработку информации о качестве протекания технологического процесса, и работающих в