

МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ОБЛАКОВ ТОЧЕК

Д.В. Шустанов¹, П.Ю. Якимов¹

¹Самарский университет, г. Самара

Аннотация

Предложен метод автоматизированного детектирования дефектов поверхности резьбовых соединений, основанный на спектральном анализе продольных профилей облаков точек 3D-сканирования и сравнении с эталонной CAD-моделью. Экспериментальная проверка на образце с искусственными дефектами подтвердила точность определения шага резьбы в 0,5% и глубины дефектов $\pm 0,1$ мм при полноте детектирования 100%.

Ключевые слова: резьбовые соединения, детектирование дефектов, облако точек, спектральный анализ, лазерное сканирование, контроль качества.

Введение

Резьбовые соединения относятся к наиболее распространенным типам разъемных соединений в машиностроении, нефтегазовой отрасли и аэрокосмической промышленности [1]. Дефекты резьбовой поверхности – сколы, трещины, задиры и износ профиля – снижают прочность соединения и могут приводить к авариям [2]. Ручной контроль не обеспечивает требуемой производительности и объективности результатов [3].

Существующие автоматизированные методы делятся на три класса:

- методы на основе 2D машинного зрения – обеспечивают точность $\pm 5-10$ мкм при измерении параметров резьбы, однако не позволяют получить полную 3D-информацию о геометрии поверхности [4];
- методы на основе 3D-сканирования (лазерная триангуляция, структурированный свет) – предоставляют полноценное объемное представление, но требуют специализированных алгоритмов обработки облаков точек [5, 6];
- гибридные методы – объединяют несколько сенсоров, повышая полноту охвата поверхности [7].

Анализ источников показал, что методы глубокого обучения (CNN, YOLO, FCN) демонстрируют высокую точность на 2D-изображениях [8], тогда как специализированные подходы для 3D-данных резьбовых поверхностей с использованием спектральных характеристик облаков точек в литературе представлены недостаточно. Цель работы – разработка и верификация такого метода.

1. Предлагаемый метод обработки облака точек

Описание метода представлено на рисунке 1.

Предложенный метод обрабатывает облако точек, полученное методом структурированного освещения или лазерного сканирования. Исходное облако точек

$P = \{p_i = (x_i, y_i, z_i)\}$ аппроксимируется цилиндрической поверхностью; ось цилиндра определяется минимизацией среднеквадратичного расстояния точек. Выполняется жёсткое преобразование $p'_i = R \cdot (p_i - t)$, приводящее ось в совпадение с осью Z пространства. Это обеспечивает инвариантность к произвольному положению детали в пространстве.

Вокруг оси цилиндра извлекаются K равномерно распределённых продольных профилей. Каждый профиль формируется выборкой точек в заданном угловом секторе и проекцией на сетку, равномерную по оси Z . Для выделения периодической структуры резьбы применяется: детрендрование профиля скользящим средним, дискретное преобразование Фурье (ДПФ), определение частоты резьбы f_{thread} как точки максимального роста амплитудного спектра, шаг резьбы $\delta = 1/f_{thread}$, локализация резьбового участка по амплитудной огибающей узкополосно-фильтрованного сигнала (преобразование Гильберта).

По определённым параметрам δ и диаметру D из базы данных CAD-мешей загружается эталонная модель. Реальное облако точек совмещается с эталоном алгоритмом ICP (Iterative Closest Point) [9]. Далее, вычисляется отклонение точек облака от эталонной поверхности d_i , вычисляемая проецированием точки на эталонную поверхность и вычислением расстояния между проекцией и исходной точкой. Визуализация облака точек с дефектами представлено

Производится фильтрация точек по значению отклонения с порогом $|d_i| \geq \tau$. Пороговое значение дефекта $\tau = k \cdot MAD(D)$ определяется через медианное абсолютное отклонение $MAD(D) = median(|d_i - median(D)|, i = 1..N)$, ($k \in [2,5; 3,5]$), что обеспечивает робастность к выбросам. Облако, состоящее из дефектных точек, передаётся алгоритму DBSCAN [10] для кластеризации. Для каждого кластера C_j вычисляются: координаты центра, продольный и окружной размеры, площадь, максимальная и средняя глубина/высота. Визуализация облака точек представлено на рисунке 1.

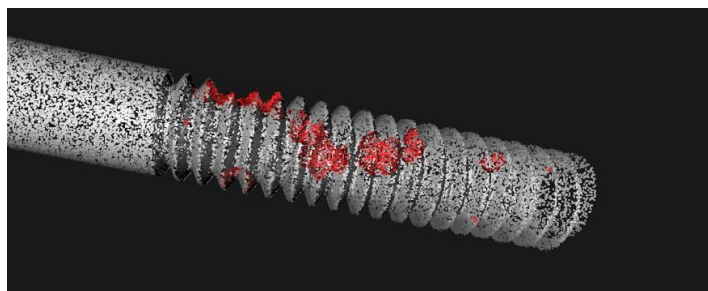


Рисунок 1 – Визуализация облака точек с дефектами. Дефектные области выделены красным цветом

2. Экспериментальное исследование

Условия эксперимента – Объект: стальная труба (Ст3) с метрической наружной резьбой, $D = 73,0$ мм, $\delta = 4,0$ мм, $L = 80$ мм, угол профиля 60° , 20 витков. На поверхность нанесены 4 дефекта с известными параметрами: глубокий скол на гребне ($h_{max} = 4,2$ мм), наплыв металла ($h_{max} = 3,8$ мм), локальный износ профиля ($h_{max} = 2,7$ мм), забоина на боковой поверхности ($h_{max} = 3,1$ мм). Параметры дефектов измерены контактным

методом (микрометр, профилометр). 3D-сканирование выполнено методом структурированного освещения с разрешением 0,05 мм.

Результаты определения параметров резьбы и дефектов представлены соответственно в таблицах 1 и 2. Все 4 дефекта успешно обнаружены. Точность ограничена разрешением сканера (0,05 мм). Для дефектов глубиной $h > 0,25$ мм относительная погрешность по глубине не превышает 4%.

Таблица 1 – Полученные значения параметров резьбы

Параметр	Номинал	Измерено	Погрешность
Наружный диаметр D	73,00 мм	73,03 мм	0,04%
Шаг резьбы δ	4,00 мм	4,02 мм	0,50%
Длина резьбы L	80,00 мм	79,80 мм	0,25%
Угол профиля α	60,0°	59,7°	0,50%

Таблица 2 – Погрешность определения параметров дефектов

Столбец 1	Ср. Абс. погрешность	Ср. Отн. погрешность	RMSE
Координата z (мм)	0,14	0,5%	0,15
Угол φ (°)	1,0	1,0%	1,0
Длина L (мм)	0,14	2,2%	0,15
Ширина W (мм)	0,10	2,7%	0,10
Макс. глубина (мм)	0,1	3,5%	0,1
Ср. глубина (мм)	0,1	5,4%	0,1
Площадь A (мм ²)	0,56	2,8%	0,59

Заключение

Разработан оригинальный метод автоматизированного детектирования дефектов резьбовых соединений, обладающий следующими ключевыми свойствами: инвариантность к ориентации детали, автоматическое определение шага и диаметра резьбы через ДПФ продольных профилей, количественная характеристика каждого дефекта: координаты, размеры, глубина, объём.

Экспериментальная верификация подтвердила работоспособность метода: шаг резьбы определяется с погрешностью 0,5%, глубина дефектов – $\pm 0,1$ мм. Метод пригоден для интеграции в системы автоматизированного контроля качества резьбовых соединений в промышленных условиях.

Перспективным направлением дальнейшего развития является дополнение предложенного метода модулем семантической классификации дефектов на основе нейронных сетей, работающих непосредственно с облаками точек (point cloud deep learning). В качестве архитектурных решений рассматриваются PointNet++, KPConv и DGCNN, способные извлекать локальные геометрические признаки из неупорядоченных 3D-данных. Разработка синтетического набора данных дефектов на основе параметрических CAD-моделей с процедурной генерацией дефектов позволит решить проблему ограниченного объёма реальных размеченных данных. Интеграция нейросетевого классификатора с существующим конвейером обработки облаков точек обеспечит переход от порогового детектирования к тонкой типизации дефектов и создаст основу для предиктивной оценки ресурса резьбовых соединений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Cognex. Automated Screw Thread Inspection. – URL: <https://www.cognex.com/industries/consumer-products/automated-assembly/automated-screw-thread-inspection> (дата обращения: 03.01.2026).
2. The Types of Screw Surface Defects. – URL: <https://www.sstls.com/the-types-of-screw-surface-defects/> (дата обращения: 03.01.2026).
3. Common Manufacturing Defects. – URL: https://www.fastener-world.com/data/pdf_download/FW_211_E_278.pdf (дата обращения: 03.01.2026).
4. Gadelmawla, E. S. Computer vision algorithms for measurement and inspection of external screw threads / E. S. Gadelmawla // Measurement. – 2017. – V. 100. – P. 36-49.
6. Lavrinov, D. S. Laser triangulation 2D scanner signal processing for premium thread pitch measurement / D. S. Lavrinov, A. I. Khorkin // Proc. ICIEAM 2017. – St. Petersburg, 2017. – P. 1–5.
7. Salvi, J. Pattern codification strategies in structured light systems / J. Salvi, J. Pagès, J. Batlle // Pattern Recognition. – 2004. – V. 37, № 4. – P. 827–849.
8. Multi-sensor data fusion for realistic and accurate 3D reconstruction / R. Fusaro [et al.] // Proc. ICARCV 2014. – Singapore, 2014. – C. 1323–1328.
9. Detection of Micro-Defects on Metal Screw Surfaces Based on Deep Convolutional Neural Networks / Y. Cui [et al.] // Sensors. – 2018. – V. 18, № 11. – P. 3709.
10. Besl, P. J. A method for registration of 3-D shapes / P. J. Besl, N. D. McKay // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – V. 14, № 2. – P. 239–256.
11. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96). – Portland, OR: AAAI Press, 1996. – P. 226–231.

METHOD OF DETECTING DEFECTS ON THREADED JOINTS BASED ON SPECTRAL ANALYSIS OF POINT CLOUDS

D.V. Shustanov¹, P.Y. Yakimov¹

¹*Samara University, Samara*

Abstract

A method for automated detection of threaded joint surface defects is proposed. It is based on spectral analysis of longitudinal profiles of 3D scanning point clouds and comparison with a reference CAD model. This method enables automatic determination of thread parameters, localization, and defect characterization. Experimental testing on a sample with artificial defects confirmed a thread pitch accuracy of 0.5% and a defect depth accuracy of ± 0.1 mm with a detection rate of 100%.

Keywords: Threaded joints, defect detection, point cloud, spectral analysis, laser scanning, quality control.