

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 681.518

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКАНИРОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Д.И. КОТЛЯР, асп., А.Н. ЛОМАНОВ, канд. техн. наук

Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева,
152935, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, e-mail: dm.kotlyar@yandex.ru

© Котляр Д.И., Ломанов А.Н., 2024

В статье рассмотрен вопрос автоматизации процесса ремонта лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) с применением системы сканирования. Предложен подход к сканированию детали системой технического зрения, установленной на том же оборудовании, на котором в последующем будет выполняться ремонт наплавкой. Отмечено, что приведенный алгоритм обладает адаптивностью к механическому состоянию оборудования. Указано, что по сравнению с ручным методом точность сканирования составляет свыше 0,05 мм ($P = 67,56\%$) и свыше 0,1 мм ($P = 95,75\%$), что достаточно для дальнейшего применения полученных сканов в задаче ремонта лопаток ГТД.

Ключевые слова: компьютерное зрение, наплавка металла, ремонт деталей, ремонт лопаток ГТД, система технического зрения, сканирование тонких кромок.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-69-78

ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинные двигатели (ГТД) широко используются в гражданской и военной авиации, судостроении, промышленности и технике. Каждый такой двигатель содержит сотни и тысячи лопаток. В процессе эксплуатации лопатки подвергаются влиянию процесса изнашивания. Вследствие изнашивания сопряженных деталей, старения материалов, нарушения процесса регулировок и различных эксплуатационных повреждений происходит постепенное или скачкообразное ухудшение их технического состояния [1]. Один из способов ремонта лопаток – метод наплавки [2], который наиболее эффективен, так как требует меньше ресурсов на наплавку и дальнейшую обработку изделия [3]. Восстановление профиля кромки лопатки вентилятора ГТД – это наиболее сложный ремонт.

Процесс ремонта деталей ГТД состоит из последовательных операций определения контура наплавки, формирования траектории наплавки и непосредственного осуществления наплавки на оборудовании для прямого нанесения металла. Для определения контура наплавки чаще всего применяются методы ручного сканирования изделия на оборудовании, на котором будет осуществляться наплавка. Чтобы осуществить процесс сканирования контура лопатки, оператор затрачивает от 120 минут, при этом контур может быть отсканирован только в 3D-координатах.

В ходе проведения патентно-информационного поиска автоматизированных методов сканирования деталей были установлены критерии классификации методов автоматизированного сканирования:

по расположению сканирующего устройства (непосредственно на станке; в общей рабочей зоне; вне рабочей зоны);

времени сканирования (перед обработкой детали; в процессе без остановки процесса обработки; в процессе с остановкой процесса обработки; в потоке; после обработки детали);

методу трехмерного сканирования (контактные сканеры; времяпролетные; лазерные сканеры фазового сдвига; триангуляционные; стереоскопические; фотометрические; силуэтные).

Данные критерии были использованы при анализе и сравнении существующих на данный момент методов сканирования. Последние различаются по расположению сканирующего устройства, используемому методу сканирования, типу получаемых данных в процессе сканирования и другим параметрам. Выполненный анализ показал, что в задаче ремонта лопаток ГТД широкое применение находят два метода: на основе фотометрического сканера [4], который позволяет восстанавливать небольшие поверхности в 2D-пространстве; на основе сканера структурированного света [5], который используется для восстановления локальных участков в 3D (выбоин, сколов). Оба представленных устройства сканирования расположены непосредственно на станке. Сканеры, располагающиеся в общей рабочей зоне [6, 7] или вне оборудования [8, 9], неприменимы для выполнения ремонта лопаток ГТД, хоть и дают хорошую точность сканирования. В настоящее время не существует метода сканирования криволинейной поверхности, который позволял бы выполнять сканирование данных поверхностей для обработки на пятикоординатном станке.

СКАНИРОВАНИЕ ДАТЧИКОМ ПРОФИЛЯ

Во время выполнения процесса наплавки необходимо выбирать нормаль сканируемой поверхности и сохранять заданную дистанцию, поэтому следует производить пятиосевую обработку, для реализации которой требуется управлять углом наклона и поворота стола установки.

Для осуществления сканирования криволинейных поверхностей предлагается математическая модель, включающая в себя комбинацию двух методов сканирования: триангуляционного и фотометрического (рис. 1).

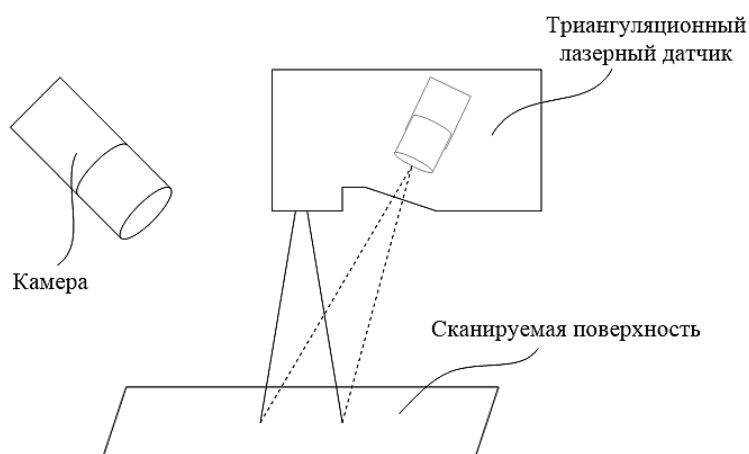


Рис. 1. Структурная схема средства измерения

Использование названной комбинации позволяет компактно разместить сканирующее устройство непосредственно на станке на общем основании с экструдером. Триангуляционный лазерный датчик предоставляет информацию о расстоянии до сканируемой поверхности, а фотометрический способ сканирования позволяет уточнить координаты левой и правой границы кромки лопатки в трехмерном пространстве.

Так как использование камеры в качестве фотометрического способа сканирования предполагает измерение размеров сканируемого объекта, необходимо проводить калибровку камеры по эталонному образцу, размеры которого заранее известны. В качестве эталонного образца выбрана масштабно-координатная бумага, выполненная в соответствии с ГОСТ 334-56.

Для калибровки камеры выполняется снимок плоской поверхности, на которой расположена бумага (рис. 2). Затем на снимке на пересечении линий сетки отмечаются точки A, B, C, D по углам области интереса и точка E в центре (рис. 3).

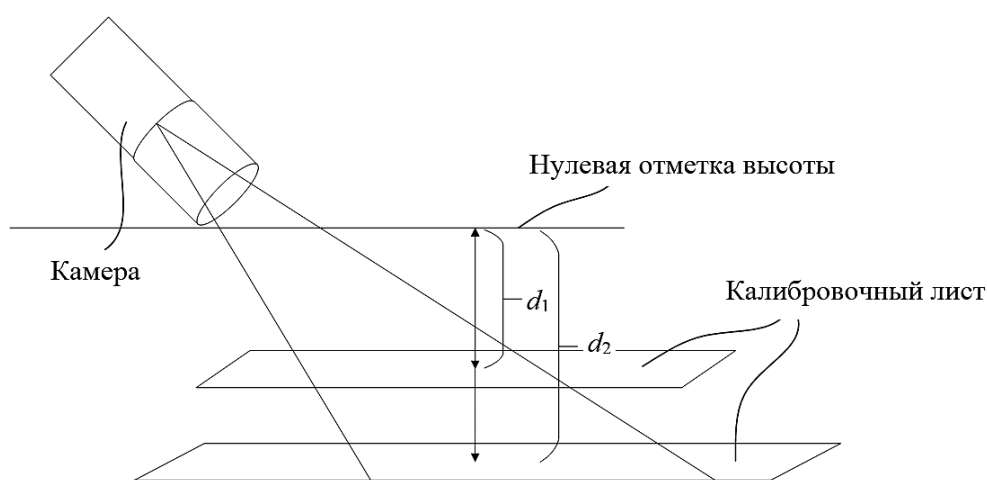


Рис. 2. Схема расположения камеры и масштабно-координатной бумаги в процессе калибровки

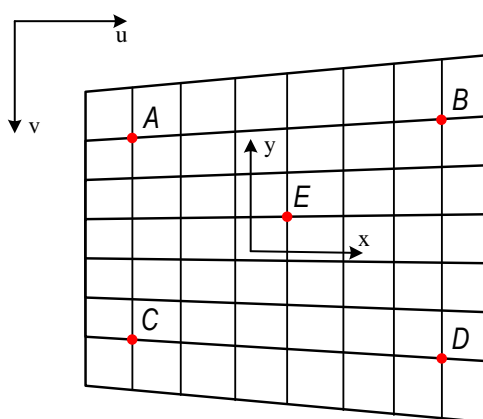


Рис. 3. Разметка точек интереса на масштабно-координатной бумаге

Для отмеченных точек задаются координаты в системе координат станка. При этом точка A имеет координаты $(0 + dX, 0 + dY)$, а координаты остальных точек

откладываются относительно точки A . Затем с помощью алгоритма перспективной трансформации вычисляется матрица преобразования координат изображения в координаты станка. Используются только точки A, B, C и D , а точка E используется для проверки корректности вычисления матрицы трансформации. Если матрица вычислена неверно, меняются значения смещения dX и dY для всех точек, после чего расчет повторяется.

Расчет матрицы трансформации повторяется два раза – для минимальной (d_1) и максимальной (d_2) дистанции сканирования. Таким образом, для работы используется матрица $M_{3 \times 3}$, которая позволяет перевести координаты из пикселей в миллиметры по формуле

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} &= M_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}; \\ M_{3 \times 3} &= M_1 \cdot (1 - p) + M_2 \cdot p; \\ p &= \frac{d - d_1}{d_2 - d_1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где u, v – координаты точки на изображении (в пикселях); M_1, M_2 – матрицы трансформации, вычисленные для минимальной и максимальной дистанции сканирования соответственно; d_1, d_2 – минимальная и максимальная дистанции сканирования, для которых были вычислены матрицы трансформации; d – дистанция сканирования в момент расчета.

Лопатка закрепляется в оснастке на столе так, чтобы ее кромка была направлена параллельно оси наклона стола. Триангуляционный лазерный датчик устанавливается таким образом, чтобы проецируемая линия была перпендикулярна направлению кромки лопатки.

На первом этапе сканирование кромки лопатки осуществляется в прямом направлении. Установка с помощью датчика профиля производит сканирование кромки лопатки, формируя облако точек в 3D. По отсканированному облаку точек (рис. 4а) аппроксимируются кромки прямыми линиями (см. рис. 4б), для найденных линий определяется левая и правая границы кромки (см. рис. 4в), которые затем также аппроксимируются прямыми линиями (см. рис. 4г). Затем по формуле по четырем точкам (начала и конца левой и правой границы) вычисляется вектор нормали поверхности:

$$\begin{aligned} \vec{n}(p_0, p_1, p_2) &= \begin{bmatrix} y_0 \cdot z_1 - y_0 \cdot z_2 - y_1 \cdot z_0 + y_1 \cdot z_2 + y_2 \cdot z_0 - y_2 \cdot z_1 \\ -x_0 \cdot z_1 + x_0 \cdot z_2 + x_1 \cdot z_0 - x_1 \cdot z_2 - x_2 \cdot z_0 + x_2 \cdot z_1 \\ x_0 \cdot y_1 - x_0 \cdot y_2 - x_1 \cdot y_0 + x_1 \cdot y_2 + x_2 \cdot y_0 - x_2 \cdot y_1 \end{bmatrix}; \\ \vec{N} &= \frac{\vec{n}(P_1, P_3, P_2) + \vec{n}(P_1, P_3, P_4) + \vec{n}(P_3, P_4, P_2) + \vec{n}(P_4, P_2, P_1)}{4}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ – координаты точек p_0, p_1 и p_2 соответственно; P_1, P_2, P_3, P_4 – координаты точек начала и конца левой и правой границы кромки лопатки.

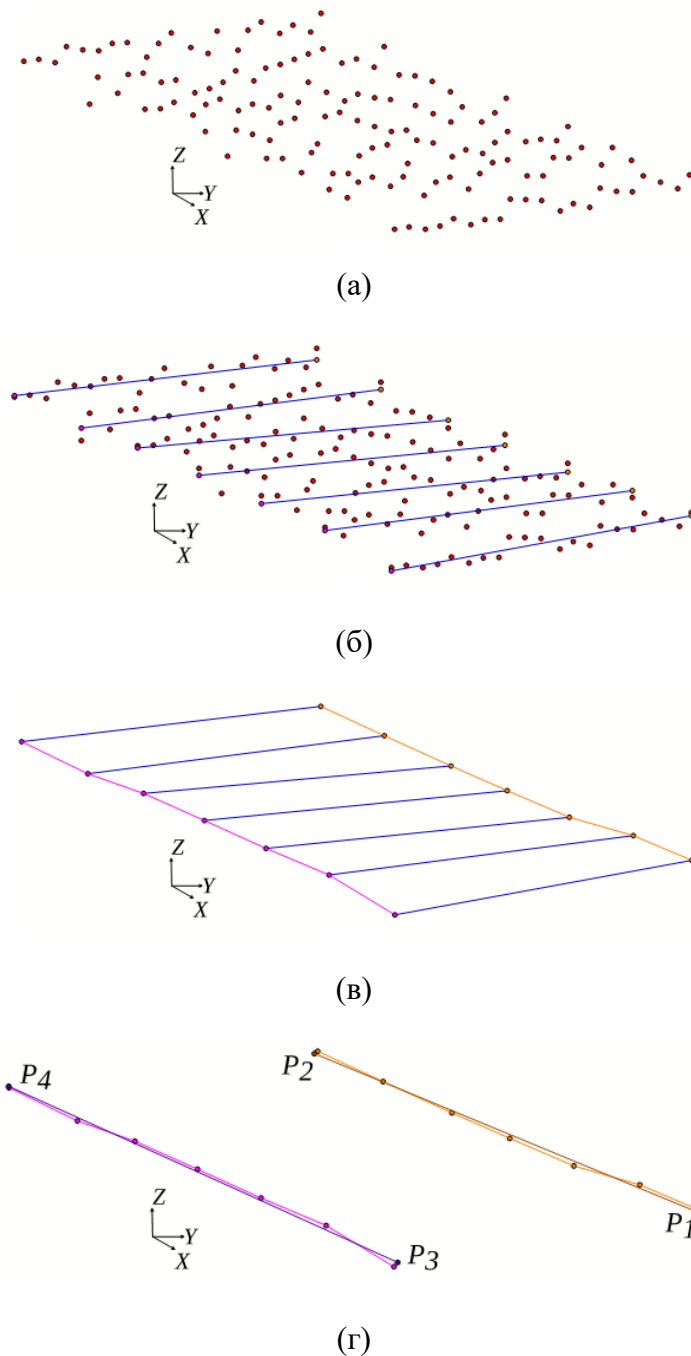


Рис. 4. Определение нормали поверхности по данным с датчика профиля:
 облако точек в 3D (а); определение плоскости кромки лопатки (б);
 определение границы кромки лопатки (в);
 линейная аппроксимация границы кромки лопатки (г)

На основе найденного вектора нормали по формулам вычисляется угол коррекции положения установки для выравнивания вектора нормали до вертикального положения:

$$\Delta\gamma = -\arctan\left(\frac{\vec{N}_A}{\vec{N}_B}\right); \quad (3)$$

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\gamma) & -\sin(\Delta\gamma) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta\gamma) & \cos(\Delta\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{N}_A \\ \vec{N}_B \\ \vec{N}_C \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\Delta\omega = -\arctan\left(\frac{\vec{N}_B}{\vec{N}_C}\right), \quad (4)$$

где $\Delta\gamma$ – коррекция угла поворота стола; $\Delta\omega$ – коррекция угла наклона стола; N_A , N_B , N_C – компоненты вектора нормали.

Производится корректирование положения установки до нормали к поверхности, а также приводится датчик профиля к центру кромки лопатки и происходит переход к следующему шагу сканирования.

Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута точка завершения.

ФИЛЬТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СКАНИРОВАНИЯ

Полученные в ходе прямого сканирования результаты содержат выбросы точек при резком изменении угла нормали поверхности.

Выбросы приводят к постоянному повороту и наклону стола то в одном, то в другом (противоположном) направлении. Данное перемещение является излишним, так как вдоль кромки лопатки нормаль поверхности меняется не скачкообразно, а гладко, а также приводит к дополнительным движениям стола установки, что может сказаться на итоговом качестве наплавки, ресурсе установки, максимально возможной скорости процесса восстановления (наплавки). Данные координаты (наклон и поворот стола) определяют нормаль сканируемой поверхности по отношению к рабочему инструменту, а поскольку, как уже было сказано, нормаль поверхности кромки лопатки меняется не скачкообразно, а гладко, необходимо обработать данные фильтром нижних частот и затем для полученных новых положений стола вычислить новые положения точек левой и правой границ и вектора нормалей (рис. 5).

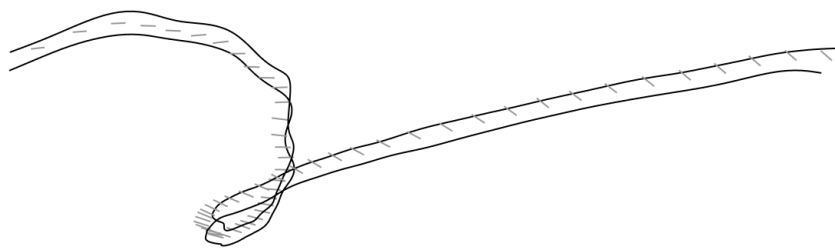


Рис. 5. Отсканированная поверхность методом прямого прохода (черная линия) и вектора нормалей (серые отрезки)

СКАНИРОВАНИЕ КРОМКИ КАМЕРОЙ

Сканирование кромки лопатки камерой позволяет уточнить реальное положение левой и правой границ кромки лопатки. Данное сканирование применяется как дополнительный этап постобработки. С конца и в обратном направлении происходит движение установки и фотографирование кромки лопатки в каждой точке. На каждом снимке выделяется граница кромки лопатки в координатах изображения (пикселях), затем данные координаты преобразуются в 3D-координаты в базисе сканера.

Для распознавания кромки были исследованы алгоритмы сегментации кромки по яркости, сегментации сверточной нейронной сетью для обнаружения контуров и семантической сегментации на основе сверточных нейронных сетей.

Наилучший результат показало применение семантической сегментации на основе сверточных нейронных сетей. Данные сети содержат кодировщик, который сжимает входной тензор в более компактное пространство, и декодировщик, который разжимает вектор признаков до оригинального размера. Модель нейронной сети определяет способ восстановления пространственной информации. Наилучший результат по предсказанию показала комбинация *UNet-InceptionResNetV2*. Эта сеть дает лучшее предсказание границы лопатки и имеет среднюю вычислительную сложность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментов была выбрана лопатка вентилятора ГТД и проведена серия экспериментов по сканированию ее системой технического зрения в разное время, с различными вариантами установки лопатки и, соответственно, отличающимися калибровками нулевой точки системы технического зрения. Сравнение результатов сканирования производилось с ручным сканированием кромки лопатки на том же самом оборудовании, на котором была установлена система технического зрения.

Для ручного сканирования использовалась камера, расположенная в экструдере установки на одной оптической оси с лазером. Нормаль поверхности лопатки устанавливалась в соответствии с точкой, отсканированной с помощью системы технического зрения, при этом нормаль в точке подтверждалась визуально. Затем в каждой точке с помощью камеры и управления осями *X* и *Y* установка наводилась на границу лопатки.

Были посчитаны отклонения по всем измерениям между ручным сканированием и автоматическим (рис. 6). Отклонение от края кромки на величину менее 0,05 мм имеет частоту 67,56 %, отклонение от края кромки на величину менее 0,1 мм – 95,75 %. Повторяемость результатов по всем измерениям (рис. 7) составила 0,025 мм с частотой 58,84 %, 0,05 мм – 84,30 % и 0,1 мм – 99,08 %. На рис. 6 и 7 плотность распределения вероятностей представлена в виде гистограммы, а суммарная вероятность представлена в виде графика.

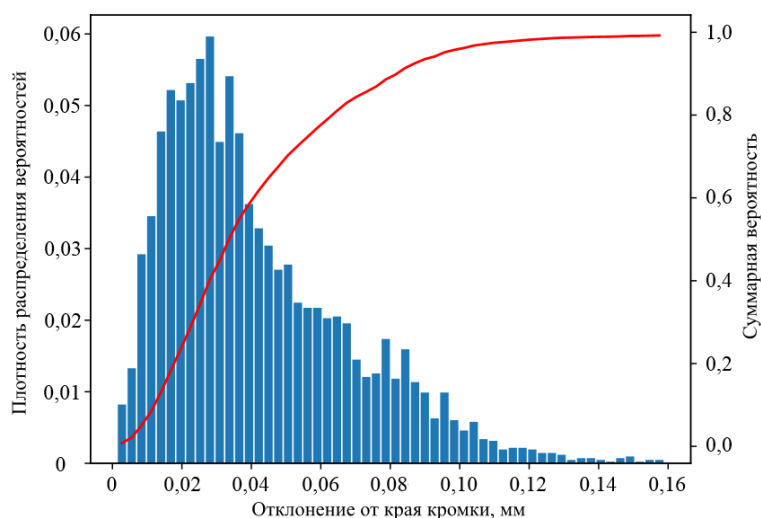


Рис. 6. Отклонение результатов автоматического сканирования от ручного в 3D по всем измерениям

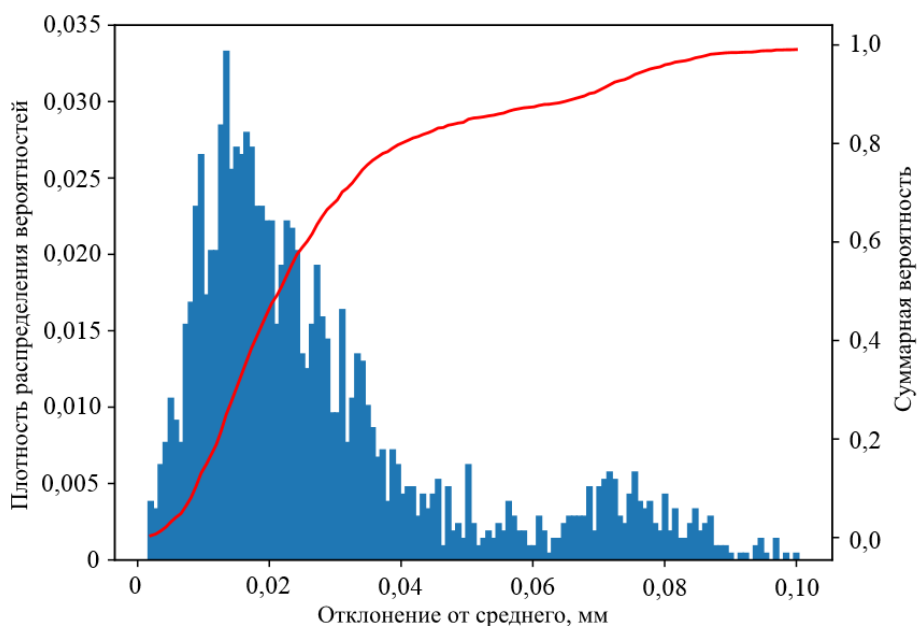


Рис. 7. Отклонение результатов автоматического сканирования от среднего (повторяемость)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы была создана математическая модель способа сканирования криволинейных поверхностей для ремонта кромок лопаток ГТД методом прямого нанесения металла. Было также проведено исследование полученной математической модели, по результатам которого определили точность цифровых 3D-сканов поверхности кромки лопатки ГТД. Установлено, что полученные системой технического зрения 3D-сканы обладают точностью свыше 0,05 мм в 67,56 % случаев и точностью свыше 0,1 мм в 95,75 % случаев, повторяемостью результатов – 0,025 мм с частотой 58,84 %, 0,05 мм с частотой 84,30 % и 0,1 мм с частотой 99,08 %. Данной точности и повторяемости достаточно для дальнейшего использования в задаче ремонта лопаток ГТД, поскольку пятно лазера составляет от 0,5 до 1,0 мм.

Погрешность результатов измерения накапливается на основе следующих составляющих: разрешение камеры – 0,028 мм/пикс; установка имеет криволинейность по осям X и Y , устранимую интерполяционной функцией, которая вычисляется автоматически по результатам сканирования сетки меток (при этом в результатах вычисления также накапливается погрешность измерения центров меток, которые имеют размер 0,01 мм); установка имеет криволинейности в других плоскостях (OXZ , OYZ), наклон и поворот стола, которые не измерялись и не компенсировались; точность семантической сегментации кромок лопаток – 97,25 %; преобразование координат с изображения в координаты станка имеет точность 0,02 мм.

Для повышения точности сканирования необходимо предпринять следующие действия:

- использовать камеру с большим разрешением съемки и (или) объективом с большим фокусным расстоянием;

- уменьшить размер маркера для устранения криволинейности станка, увеличить количество маркеров на калибровочном щите;

- исследовать и устранить погрешности в других плоскостях движения установки;

набрать большой набор снимков кромки лопатки ГТД, увеличить точность распознавания с применением сверточных нейронных сетей, в том числе исследовать возможность применения других архитектур кодировщиков и декодировщиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безъязычный В.Ф., Смирнов А.В. Анализ и направления совершенствования технологических и организационных проблем ремонта газотурбинных авиационных двигателей // *Научно-технические вестники государственного технического университета*. 2020. № 8 (110). С. 42–48.
2. Леонтьев В.А., Зиличихис С.Д., Кондратьев Э.В., Замковой В.Е. Восстановление работоспособности ГТД с применением новых технологий и материалов // *Вестник двигателестроения*. 2006. № 4. С. 99–103.
3. Бессуднов И.А. Совершенствование технологий ремонта газотурбинных авиационных двигателей с использованием ресурсосберегающих технологий. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск. 2014. 208 с.
4. Ine K. LENS Technology Overview. URL: <https://www.slideserve.com/kishi/lens-technology-overview> (дата обращения: 10.05.2023).
5. Патент РФ 2499657. *Способ автоматизированного ремонта детали машин* / Мельцер-Йокиш Т., Томаидис Д., Вилькенхенер Р.; Заявл. 16.08.2010. Оpubл. 27.11.2013. Бюл. № 33.
6. Xiaohu X., Dahu Z., Haiyang Z., Sijie Y., Han D. TCP-based Calibration in Robot-assisted Belt Grinding of Aero-engine Blades Using Scanner Measurements // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. № 90. P. 635–647.
7. Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Muszyńska M. Robotic Grinding Process of Turboprop Engine Compressor Blades with Active Selection of Contact Force // *Tehnički vjesnik*. 2022. № 29. P. 15–22.
8. Патент РФ 2708940. *Способ измерения трехмерной геометрии выпуклых и протяженных объектов* / Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Щепихин И.В., Кабардин И.К., Куликов Д.В.; Заявл. 15.01.2019. Оpubл. 12.12.2019. Бюл. № 35.
9. Патент РФ 2295110. *Способ измерения формы поверхности объекта и представления результатов измерения на упомянутой поверхности* / Сивохин А.В., Кузнецов А.Б., Бабичев Г.С.; Заявл. 13.10.2005. Оpubл. 10.03.2007. Бюл. № 7.

Для цитирования: Котляр Д.И., Ломанов А.Н. Математическая модель сканирования криволинейных поверхностей // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (21). С. 69–78.

A CURVED SURFACE SCANNING MATHEMATICAL MODEL

D.I. KOTLYAR, Postgraduate, A.N. LOMANOV, Cand. Sc.

P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
53, Pushkina str., Yaroslavl region, Rybinsk, 152935, e-mail: dm.kotlyar@yandex.ru

The article considers the issue of automating the repair process of gas turbine engine (GTE) blades using a scanning system. The approach to scanning of the part by the vision system installed on the same equipment, on which the cladding repair will be performed later, is proposed. It is noted that the above algorithm is adaptive to the mechanical condition of the equipment. It is indicated that in comparison with the manual method the scanning accuracy

is over 0.05 mm ($P = 67.56\%$) and over 0.1 mm ($P = 95.75\%$), which is sufficient for further application of the obtained scans in the task of GTE blade repair.

Keywords: computer vision, metal deposition, metal parts repair, GTE blade repair, machine vision system, scanning thin blades.

Поступила в редакцию/received: 25.10.2023; после рецензирования/revised: 31.10.2023;
принята/accepted: 10.11.2023

УДК 004.3

ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ МАЛОЗАМЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ФОРМИРУЕМЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРОМ В СЛОЖНЫХ ФОНОВЫХ УСЛОВИЯХ

В.К. КЕМАЙКИН¹, канд. техн. наук, А.Ю. КОЗЛОВ², канд. техн. наук,
А.А. ХРАМИЧЕВ³, канд. техн. наук

¹Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vk-kem@mail.ru

²АО Научно-производственное предприятие «Эргоцентр»
170021, Тверь, ул. Хрустальная, д. 2, корп. 4

³АО «Специальное проектно-конструкторское бюро средств управления»
170100, Тверь, Вагжановский пер., д. 9

© Кемайкин В.К., Козлов А.Ю., Храмичев А.А., 2024

В статье предложено использование автоматического адаптивного обнаружителя, реализующего локально наиболее мощный несмещенный (ЛНМН) критерий, и проведено его сравнение с обнаружителем по критерию Неймана – Пирсона для экстремально сложных условий наблюдения для оптико-электронных приборов. Построены рабочие характеристики адаптивного обнаружения слабоконтрастных изображений динамических объектов в сложных фоновых условиях. Получены расчетные оценки, подтверждающие превосходство ЛНМН-правила над классическим правилом Неймана – Пирсона.

Ключевые слова: оптико-электронный прибор, динамический объект, изображение, фоноцелевой кадр, критерии и характеристики обнаружения.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-78-84

ВВЕДЕНИЕ

Под характеристикой обнаружителя понимается принятая в статистической теории обнаружения сигналов [1] зависимость вероятности правильного обнаружения цели – динамического объекта (ДО) – от отношения «сигнал/шум» (ОСШ) при заданной вероятности ложной тревоги, которая определяет мощность обнаружителя.

Ниже рассмотрены два обнаружителя: предложенный, реализующий локально наиболее мощный несмещенный (ЛНМН) критерий, и обнаружитель, реализующий классический критерий Неймана – Пирсона для экстремально сложных условий наблюдения (это низкий (включая отрицательный) контраст объекта и наличие

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*