

МЕТОД СКАНИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РЕМОНТА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2023

Д. И. Котляр аспирант кафедры электротехники и промышленной электроники;
Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева;
dm.kotlyar@yandex.ru

А. Н. Ломанов кандидат технических наук, доцент, директор института
информационных технологий и систем управления;
Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева;
lepss@yandex.ru

Повышение эффективности ремонта лопаток газотурбинного двигателя методом наплавки за счёт разработки и внедрения метода сканирования сложнопрофильных криволинейных поверхностей лопаток газотурбинного двигателя непосредственно на оборудовании для осуществления наплавки является целью данного исследования. Предлагается подход к сканированию системой технического зрения детали, установленной на том же оборудовании, на котором выполняется ремонт наплавкой, рядом с соплом. Система технического зрения состоит из триангуляционного лазерного датчика (2D-профилометра) и камеры. Предложенный алгоритм обладает адаптивностью к механическому состоянию оборудования, на котором выполняется сканирование и наплавка. Полученные с системы технического зрения 3D-сканы обладают точностью свыше 0,05 мм в 67,56% случаев, и точностью свыше 0,1 мм в 95,75% случаев, что при пятне лазера от 0,5 до 1,0 мм достаточно для дальнейшего использования полученных сканов в задаче ремонта лопаток газотурбинных двигателей. Предложенный подход позволяет ускорить подготовку технологических программ наплавки в 10 раз по сравнению с ручным методом сканирования.

Компьютерное зрение; наплавка металла; ремонт лопаток газотурбинного двигателя; сканирование тонких поверхностей

Цитирование: Котляр Д.И., Ломанов А.Н. Метод сканирования тонких поверхностей при выполнении ремонта лопаток газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 112-124. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-112-124

Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) используются в гражданской и военной авиации, в качестве корабельных силовых установок, в стационарных и передвижных энергетических установках, газоперекачивающих станциях. Авиационный ГТД насчитывает 3000 и более лопаток разных типоразмеров.

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].

Существующие технологические процессы ремонта лопаток ГТД предусматривают надёжное выявление повреждений существующими методами и восстановление деталей или их замену с минимальными затратами времени и материальных средств. Одним из методов ремонта лопаток ГТД является метод ремонта наплавкой [2]. Наиболее сложным ремонтом является восстановление профиля кромки лопатки вентилятора ГТД.

Совершенствование процессов ремонта лопаток ГТД на всех этапах становления и развития гражданской авиации остаётся актуальным и востребованным. Современные

аддитивные технологии наплавки являются более экономичными и требуют затраты меньшего количества ресурсов на наплавку и дальнейшую обработку изделия [3]. Применение аддитивных технологий в сфере ремонта сложных деталей, таких как лопатки газотурбинных двигателей, накладывает дополнительные требования на оборудование и программное обеспечение для автоматической подготовки ЧПУ-программ. Процесс ремонта деталей ГТД состоит из последовательных операций определения контура наплавки, формирования траектории наплавки и непосредственное осуществление 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.

Необходимость проведения данной работы обусловлена рядом факторов, наиболее важным из которых является отсутствие методов сканирования сложнопрофильных криволинейных поверхностей лопаток ГТД без использования оригинальной 3D-модели лопатки с достаточной для проведения ремонтных работ точностью итогового скана поверхности.

Технологии сканирования деталей

Технология трёхмерного 3D-сканирования получила широкое развитие и находит своё применение в промышленности. Эту технологию используют как инструмент для точного реверс-инжиниринга, точного контроля качества и геометрии изготовленных деталей, в процессе механической обработки, в качестве инструмента для клонирования и ремонта деталей с применением аддитивных технологий [4 – 6].

В контексте применения трёхмерного сканирования с обработкой деталей на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах средства сканирования могут располагаться как автономно (*standalone*), в том числе в общей рабочей зоне (*in-situ*) и вне рабочей зоны (*off-machine*), так и непосредственно на станке (*on-machine*) [7; 8].

Автономные устройства трёхмерного сканирования, как правило, обладают большей точностью измерения, поскольку не ограничены в массогабаритных характеристиках, обладают собственной системой управления и перемещения, способны обеспечить требуемые условия окружающей среды: температуры, влажности, содержание твёрдых частиц [9]. В свою очередь, применение автономных сканеров требует объединения систем координат сканера и рабочего инструмента [10]. Привязка систем координат является важным этапом процесса обработки деталей, и точность выполнения данной операции определяет итоговую точность получения трёхмерного скана, выполненного на автономных устройствах [11]. Задача привязки систем координат решалась, например, в работах [12 – 15].

Технологии сканирования в общей рабочей зоне представлены в [16 – 18], в которых предложено рабочую зону оснастить стационарным или подвижным 3D-сканером. При этом обрабатываемая деталь либо перемещается с помощью шарнирно-сочленённого робота-манипулятора, либо деталь обрабатывается будучи закреплённой в такой манипулятор.

В работах [19 – 21] описывается способ сканирования деталей непосредственно на оборудовании. Предлагается закрепить деталь в оснастку и производить сканирование устройством, расположенным рядом с рабочим инструментом или сканером, который крепится вместо рабочего инструмента, а затем происходит смена сканера на рабочий инструмент.

Современные устройства оцифровки объёмных изделий (3D-сканеры) строятся на базе двух концепций: пассивные стереоскопические и активные сканеры со структурированным подсветом [22]. Активные сканеры состоят из пары «камера и проектор», детализация сканирования зависит от разрешения камеры и дистанции до объекта [23].

Применение 3D-сканеров в общем случае требует подготовки объекта к оцифровке, нанесение матирующей плёнки, проведение дополнительной постобработки полученного цифрового слепка, в том числе вручную [24].

В качестве альтернативы оптическим сканерам могут быть использованы лазерные триангуляционные сканеры, применение которых описано в работах [5; 25; 26].

Для ремонта деталей простой формы достаточно получить трёхмерный скан обрабатываемой поверхности и произвести расчёт трёхмерного восстановления с помощью трёхкоординатного ЧПУ-станка или шарнирно-сочленённого роботоманипулятора [27; 28]. Однако для ремонта сложнопрофильных криволинейных поверхностей необходимо также повторять профиль рабочим инструментом для сохранения ориентации поверхности по нормали к инструменту [29], поэтому необходимо использовать пятикоординатные станки с ЧПУ или шарнирно-сочленённого роботоманипулятора.

Используемое оборудование

Ремонт лопаток ГТД имеет следующий технологический цикл: 1) фрезеровка участка лопатки с дефектом; 2) определение контура наплавки и формирование траектории экструдера; 3) наплавка материала с избытком; 4) восстановление формы лопатки ГТД.

Использованная в работе установка Optomec Lens 850-R для ремонта лопаток ГТД содержит пять степеней свободы, позволяющих производить ремонт изделий вариативной сложности. Изделие для ремонта крепится в оснастку на рабочем столе установки. Стол имеет две степени свободы: наклон и поворот, тем самым позволяет устанавливать лопатку в позицию, перпендикулярную экструдеру установки, и изменять положение лопатки непрерывно в течение всего производственного цикла наплавки. Перемещение экструдера осуществляется по порталному принципу в трёх плоскостях. В классическом варианте определение контура наплавки осуществляется вручную. Оператор осуществляет перемещение экструдера, наклон и поворот стола и последовательно обходит деталь. Установка снабжена камерой, находящейся на одной оптической оси с лазером.

В качестве альтернативы в работе рассмотрен подход с применением промышленного сканера ATOS ScanBox 5120. Полученные на установке трёхмерные сканы были сопоставлены с результатами ручного сканирования (рис. 1). Для анализа результатов использовалось программное обеспечение CloudCompare. Среднее расхождение между кромками при ручном сканировании и использовании внешнего сканера составило 4,15 мм, максимальное расхождение – до 15 мм. Такое значительное расхождение можно объяснить неоткалиброванными и неровными осями установки для ремонта лопаток.

Проведённые исследования установки Optomec Lens 850-R показывают среднее отклонение экструдера при движении в плоскости OXY 1,99 мм, максимальное отклонение – свыше 3,3 мм от выбранной базовой точки (рис. 2). Отклонения при движении в других плоскостях: OYZ , OXZ , а также при наклоне и повороте стола не исследовались.

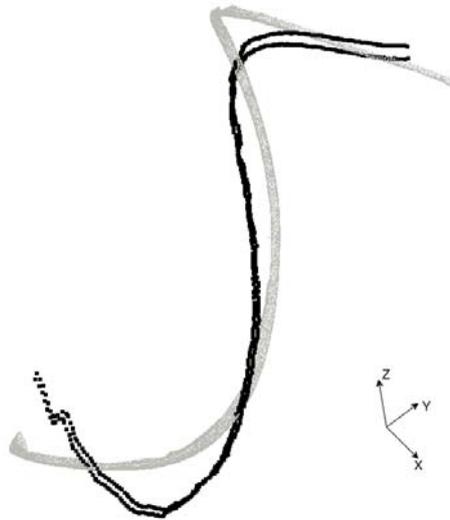


Рис. 1. Результат совмещения 3D-сканов, полученных на установке ATOS ScanBox 5120 (серый) и ручным методом (чёрный) в программе CloudCompare

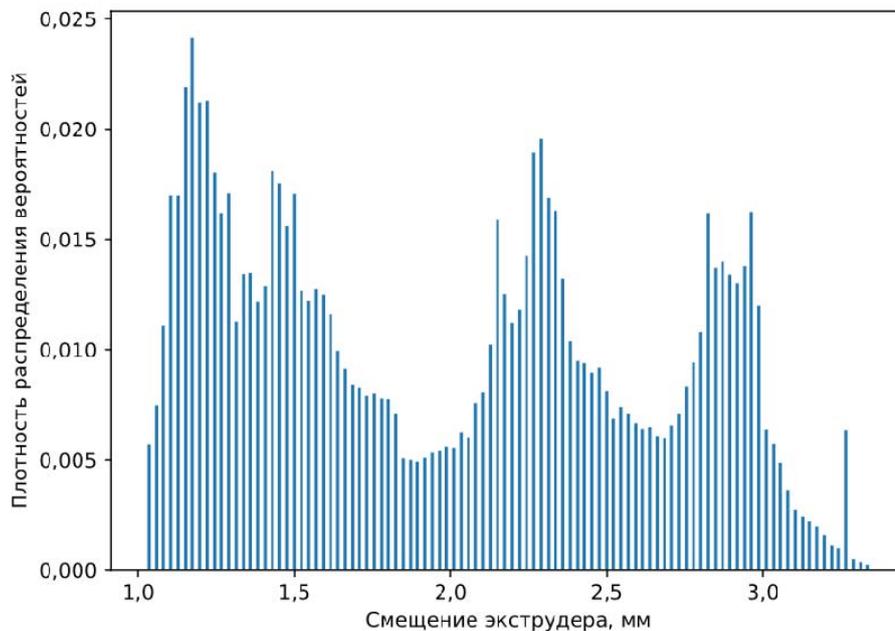


Рис. 2. Смещение экструдера при движении в плоскости OXY

Таким образом, использование результатов сканирования, полученных с помощью внешних сканеров, для выполнения ремонта лопаток ГТД на установке прямого нанесения металла Optomec Lens 850-R невозможно.

Для решения задачи совмещения достоинств ручного и автоматического сканирования предложено перенести сканер непосредственно в камеру установки и закрепить его на общем основании с экструдером. Таким образом, сканер и экструдер будут работать в единой системе координат, результаты сканирования будут сразу представлены в системе отсчёта с базисом в центре стола.

Сканирование кромки лопатки датчиком профиля

На первом этапе сканирование кромки лопатки осуществляется в прямом направлении. Установка с помощью датчика профиля производит сканирование кромки лопатки. Сканирующее устройство предоставляет информацию как облако точек в 2D (срез плоскостью). Данное облако точек аппроксимируется прямыми линиями (рис. 3).

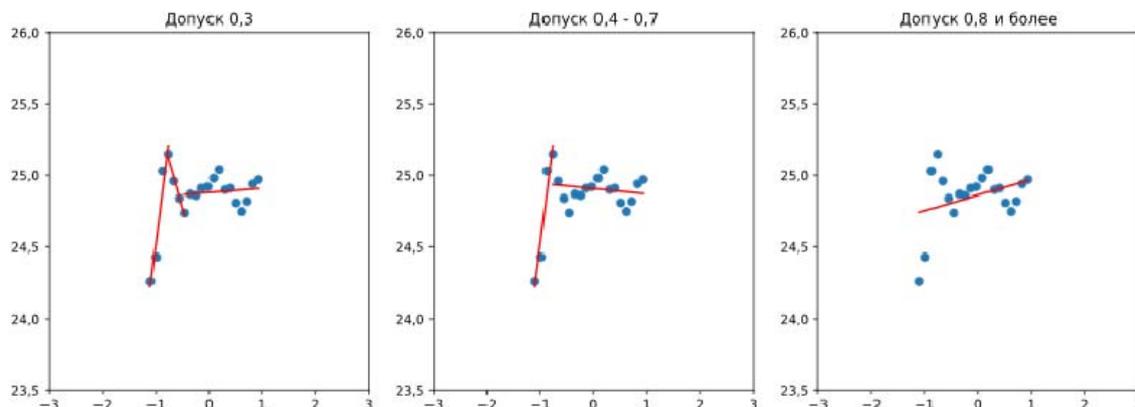


Рис. 3. Аппроксимация облака точек с датчика профиля

Величина допуска подбирается таким образом, чтобы с одной стороны сканируемая кромка не была излишне разбита на куски из-за неправильного сканирования датчиком вследствие каких-то небольших дефектов по краям кромки, бликов и переотражений, как это показано на рис. 3 с допуском 0,3. С другой стороны, допуск не должен быть слишком большим, чтобы край кромки не был сглажен аппроксимирующим фильтром, как это показано на рис. 3 с допуском 0,8 и более. Оптимальный подобранный допуск для датчика Vaumer OXP200-R05C.004 составил 0,6 на первом шаге сканирования, при этом выбирается линия, находящаяся строго по центру датчика.

На втором и последующем шаге сканирования профиль аппроксимируется пакетом фильтров, при этом выбирается линия наиболее похожая (подобная) на кромку с предыдущего шага, т. к. кромка на небольшом расстоянии не может значительно измениться. При этом учитываются такие параметры подобия как угол наклона линии, длина линии, положение линии относительно датчика профиля, насколько линия горизонтальна, насколько линия близка к требуемой высоте сканирования. По данным параметрам вычисляется взвешенное среднее арифметическое отклонение и выбирается линия с минимальным отклонением. Оптимальный пакет фильтров для датчика Vaumer OXP200-R05C.004 содержит значения от 0,3 до 0,8 включительно с шагом 0,1.

Для найденной линии вычисляется отклонение установки от центра линии, данное значение участвует в коррекции движения установки при переходе к следующей точке сканирования.

Затем найденная линия в 2D-координатах датчика профиля преобразуется к 3D-координатам путём сложения их с координатами установки. Найденные точки линии приводятся к общему виду преобразованием положения точки в положение с углом поворота и наклона стола, равным нулю.

Для заданного окна сканирования вычисляется аппроксимирующая прямая линия левой и правой границы кромки. Затем по четырём точкам (начала и конца левой и правой границы) вычисляется вектор нормали поверхности как среднее арифметическое четырёх векторов нормалей, образованных по данным четырём точкам.

По найденному вектору нормали вычисляется угол коррекции положения установки для выравнивания вектора нормали до вертикального положения.

Производится корректирование положения изделия по нормали к датчику профиля, выравнивается положение кромки к центру датчика. Далее происходит переход к следующему шагу сканирования. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута точка завершения.

Результат сканирования в прямом направлении содержит список пар точек (левой и правой границы), которые задаются их положением в 3D и вектором нормали. По вектору нормали точки можно определить положение всех пяти координат установки для выравнивания поверхности по нормали к датчику и к экструдеру установки.

Фильтрация результатов сканирования

Полученные в ходе прямого сканирования результаты содержат выбросы точек при резком изменении угла нормали поверхности. Данные выбросы приводят к постоянному повороту и наклону стола то в одном, то в противоположном направлении. Такое перемещение является излишним, поскольку 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).

Поскольку описание точки в форме записи «3D-координата и вектор нормали» может быть преобразовано к форме записи «5D-координата», то предлагается полученные на этапе прямого сканирования значения углов поворота и наклона стола пропустить через фильтр нижних частот (рис. 4), а затем для полученных новых положений стола вычислить новые положения точек левой и правой границы.

Применение фильтрации позволяет сгладить представление поверхности, а также минимизировать вращение и наклон стола, а следовательно и детали, в процессе наплавки. Результат фильтрации по формату выходных данных и по количеству данных совпадает с форматом сканирования в прямом направлении.

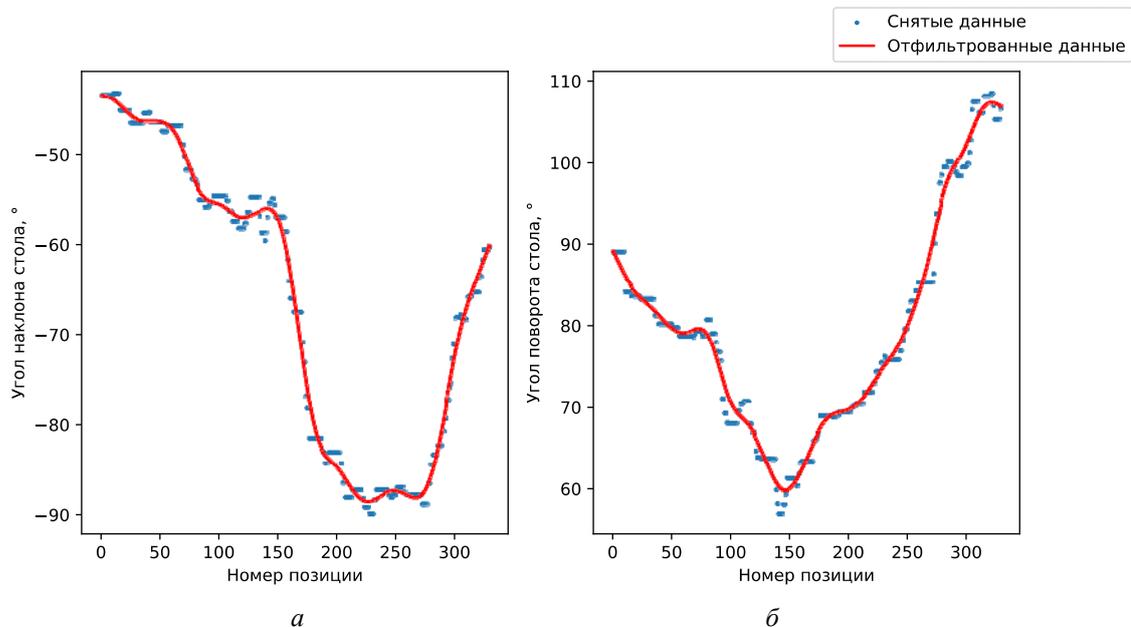


Рис. 4. Положение осей наклона (а) и поворота (б) стола до фильтрации и после применения фильтра

Сканирование кромки лопатки камерой

Сканирование кромки лопатки камерой позволяет уточнить реальное положение левой и правой границы кромки лопатки. Такое сканирование применяется как дополнительный этап постобработки для сканирования в прямом направлении. По отфильтрованной поверхности, начиная 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 с помощью заранее определённой матрицы трансформации координат на изображении трансформируются в 2D координаты смещения относительно центра датчика (центра камеры). Найденные смещения добавляются к текущим координатам датчика (камеры) в 3D, таким образом находят реальные координаты левой и правой границы кромки лопатки.

Были проверены несколько алгоритмов для сегментации кромки лопатки от фона на изображении. Наилучшую точность предсказания за приемлемое время даёт алгоритм семантической сегментации на базе свёрточной нейронной сети архитектуры Unet с кодировщиком InceptionResNetV2, предобученным на наборе данных ImageNet. Преимущество сети Unet по сравнению с другими архитектурами можно объяснить тем, что данная архитектура была создана для семантической сегментации медицинских изображений, для которых характерен постоянный ракурс и масштаб объектов [30], что соответствует постановке рассматриваемой задачи.

Анализ результатов

Для проведения экспериментов была выбрана лопатка вентилятора ГТД. Проведена серия экспериментов по сканированию лопатки системой технического зрения 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 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, сохранялись текущие координаты в форме записи 3D и 2D (плоскость).

При сопоставлении результатов ручного сканирования и сканирования системой технического зрения был сделан вывод, что результат сканирования в 2D аналогичен результату в 3D, поэтому для использования можно выбрать способ, удобный в каждом конкретном случае.

Были посчитаны отклонения по всем измерениям между ручным сканированием и автоматическим (рис. 5). Отклонение от края кромки на величину менее 0,05 мм имеет вероятность 67,56%, отклонение от края кромки на величину менее 0,1 мм имеет вероятность 95,75 %.

Повторяемость результатов по всем измерениям (рис. 6) составила 0,025 мм с вероятностью 58,84%; 0,05 мм с вероятностью 84,30%; 0,1 мм с вероятностью 99,08%.

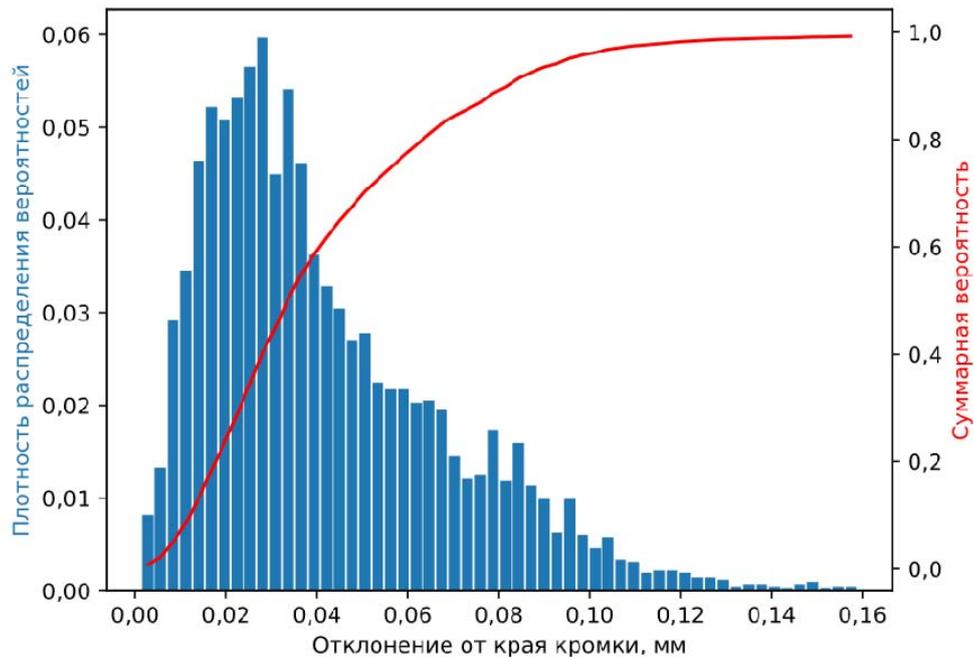


Рис. 5. Гистограмма отклонений результатов ручного сканирования от автоматического в 3D по всем измерениям

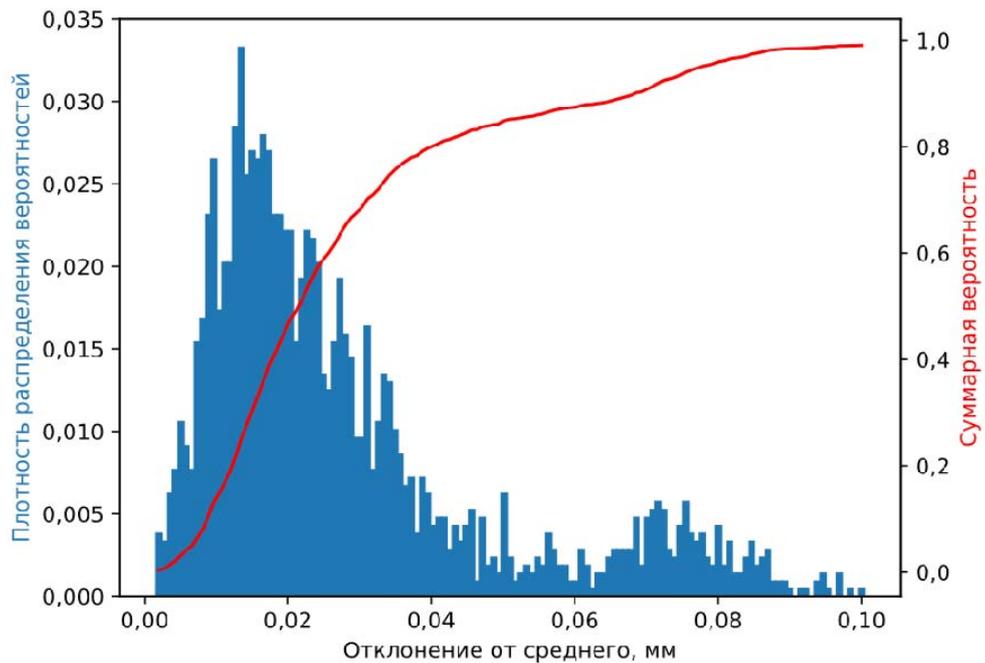


Рис. 6. Гистограмма отклонений результатов автоматического сканирования от среднего (повторяемость)

Заключение

В результате проведенного исследования была определена точность получаемых цифровых 3D-сканов кромки лопатки ГТД.

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, повторяемость результатов 0,025 мм с вероятностью 58,84%; 0,05 мм с вероятностью 84,30%; 0,1 мм с

вероятностью 99,08%, что при пятне лазера от 0,5 до 1,0 мм достаточно для дальнейшего использования полученных сканов в задаче ремонта лопаток ГТД.

Использование 3D-сканов, полученных от внешних систем, в задаче ремонта лопаток ГТД на оборудовании Optomes Lens 850-R не представляется возможным, по крайней мере до приведения состояния осей (их соосности, перпендикулярности и прямолинейности) до идеального состояния.

К достоинствам предложенного подхода относятся: 1) адаптивность алгоритма к механическому состоянию оборудования, на котором осуществляется сканирование и наплавка; 2) скорость подготовки программы наплавки по сравнению с ручным методом.

Недостатками предложенного подхода являются: 1) необходимость выполнять сканирование и ремонт последовательно и за одну установку, что исключает возможность обрабатывать детали параллельно, т. е. сканирование следующей детали или подготовка управляющей программы совместно с ремонтом текущей детали; 2) невозможность использования полученных результатов сканирования для решения других задач (не связанных с наплавкой) на оборудовании, на котором были получены 3D-сканы.

Библиографический список

1. Безъязычный В.Ф., Смирнов А.В. Анализ и направления совершенствования технологических и организационных проблем ремонта газотурбинных авиационных двигателей // *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2020. № 8 (110). С. 42-48. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-8-42-48
2. Леонтьев В.А., Зиличихис С.Д., Кондратюк 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. Galantucci L.M., Piperi E., Lavecchia F., Zhavo A. Semi-automatic low cost 3D laser scanning systems for reverse engineering // *Procedia CIRP*. 2015. V. 28. P. 94-99. DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.016
5. Ahmadi S.A., Mohammadzadeh A., Hosseinaveh A. Introduction of a domestic scanner for 3D object modeling and its evaluation // 1st National Conference on Geospatial Information Technology (January, 19-20 января, 2016, Tehran, Iran).
6. Salehi V., Wang S. Using point cloud technology for process simulation in the context of digital factory based on a systems engineering integrated approach // *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design, ICED17* (August, 21-25, 2017, Vancouver, Canada). V. 3. P. 11-20.
7. Mutilba U., Gomez-Acedo E., Kortaberria G., Olarra A., Yagüe-Fabra J.A. Traceability of on-machine tool measurement: a review // *Sensors*. 2017. V. 17, Iss. 17. DOI: 10.3390/s17071605
8. Horst J., Hedberg T., Feeney A.B. On-machine measurement use cases and information for machining operations. Report no. 400-1. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2019. 61 p. DOI: 10.6028/NIST.AMS.400-1
9. Logee S. Quality in manufacturing. On-machine measurement. <http://www.toolingandproduction.com/qim/1004on-machine.aspx>
10. Дорожкин И.Н., Дорожкина О.К., Шинкевич И.А. Особенности внедрения цифрового производства на основе автоматизации процессов производственного и

операционного менеджмента на промышленном предприятии // Вестник МГТУ «Станкин». 2018. № 2 (45). С. 112-116.

11. Srinivasan H., Harrysson O., Wysk R. Automatic part localization in a CNC machine coordinate system by means of 3D scans // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. V. 81. P. 1127-1138. DOI: 10.1007/s00170-015-7178-z

12. Зеленский А.А., Франц В.А., Семенищев Е.А. Алгоритм планирования траектории рабочего органа манипулятора для привязки базисных систем координат с использованием технического зрения // Вестник машиностроения. 2019. № 10. С. 3-7.

13. Xiong X.H., Chen J.L., Quan D.M. Directly manufacturing mouse mold by plasma deposition manufacturing // Advanced Materials Research. 2014. V. 941-944. P. 2190-2193. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2190

14. Skotheim O., Lind M., Ystgaard P., Fjerdingen S.A. A flexible 3D object localization system for industrial part handling // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (October, 07-12, 2012, Vilamoura-Algarve, Portugal). DOI: 10.1109/IROS.2012.6385508

15. Okarma K., Grudzinski M. The 3D scanning system for the machine vision based positioning of workpieces on the CNC machine tools // Proceedings of the 17th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR) (August, 27-30, 2012, Miedzyzdroje, Poland). DOI: 10.1109/MMAR.2012.6347906

16. Xu X., Zhu D., Zhang H., Yan S., Ding H. TCP-based calibration in robot-assisted belt grinding of aero-engine blades using scanner measurements // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. V. 90. P. 635-647. DOI: 10.1007/s00170-016-9331-8

17. Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Muszyńska M. Robotic grinding process of turboprop engine compressor blades with active selection of contact force // Technical Gazette. 2022. V. 29, no. 1. С. 15-22. DOI: 10.17559/TV-20190710141137

18. Kurc K., Burghardt A., Gierlak P., Muszyńska M., Szybicki D., Ornat A., Uliasz M. Application of a 3D scanner in robotic measurement of aviation components // Electronics. 2022. V. 11, Iss. 19. DOI: 10.3390/electronics11193216

19. Diao S., Chen X., Luo J. Development and experimental evaluation of a 3D vision system for grinding robot // Sensors. 2018. V. 18, Iss. 9. DOI: 10.3390/s18093078

20. Xu J., Xu L., Li Y., Sun Y. Shape-adaptive CNC milling for complex contours on deformed thin-walled revolution surface parts // Journal of Manufacturing Processes. 2020. V. 59. P. 760-771. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.001

21. Афонин В.Л., Смоленцев А.Н., Яковлев М.Г. Интеллектуальные робототехнические комплексы для финишной обработки сложных поверхностей // Труды Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (7-8 июня 2018 г., Санкт-Петербург). СПб.: Политехника Сервис, 2018. С. 161-170.

22. Шадрин М.В. Лазерный триангуляционный 3D метод и устройство для прототипирования и изготовления сложных изделий. Дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2020, 194 с.

23. Franca J.G.D.M., Gazziro M.A., Ide A.N., Saito J.H. A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view // Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing 2005 (September, 14, 2005, Genova). DOI: 10.1109/ICIP.2005.1529778

24. Петров М.А., Эльдиб И.С.А. Получение 3D-моделей листовых и объёмных деталей, изготовленных методами холодного деформирования, при помощи оптического сканирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 9. С. 471-479.

25. Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Шадрин Г.К., Кадыролдина А.Т., Құсайын-Мұрат Т. Разработка системы управления промышленным роботом-манипулятором для трёхмерного сканирования поверхностей // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2019. № 1. С. 81-87.

26. Бусурин В.И., Чжэ Л., Кудрявцев П.С. Управление бесконтактным профилометром при сканировании поверхностей сложного профиля // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 10. С. 529-535. DOI: 10.17587/mau.23.529-535

27. Лосев Е.Д., Свиначев А.А., Мишуров С.В., Белкина А.В., Степина А.С. Автоматизация восстановления рабочего колеса братской ГЭС // Механики XXI века. 2018. № 17. С. 169-174.

28. Мельцер-Йокиш Т., Томаидис Д., Вилькенхенер Р. Способ автоматизированного ремонта детали машин: патент РФ № 2499657; опублик. 27.11.2013; бюл. № 33.

29. Wang X., Deng D., Hu Y., Ning F., Wang H., Cong W., Zhang H. Overhang structure and accuracy in laser engineered net shaping of Fe-Cr steel // Optics & Laser Technology. 2018. V. 106. P. 357-365. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.04.015

30. Горбачёв В.А., Криворотов И.А., Маркелов А.О., Котлярова Е.В. Семантическая сегментация спутниковых снимков аэропортов с помощью свёрточных нейронных сетей // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 4. С. 636-645. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-636

METHOD OF SCANNING THIN SURFACES IN REPAIRING GAS TURBINE BLADES

© 2023

D. I. Kotlyar Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics;
Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University;
dm.kotlyar@yandex.ru

A. N. Lomanov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Information Technologies and Control Systems;
Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University;
lepss@yandex.ru

Improving the efficiency of weld overlay repair of gas turbine blades by developing and implementing a method of scanning complex curved surfaces of gas turbine blades directly on the machine is the aim of this work. The paper proposes an approach to scanning a blade with a computer vision system mounted near the nozzle on the same machine that is used for direct metal deposition. The computer vision system consists of a triangulation laser sensor and a camera. The proposed algorithm is adaptive to the mechanical condition of the equipment used for scanning and metal deposition. The scans obtained from the machine vision system have precision better than 0.05 mm in 67.56% of cases, and precision better than 0.1 mm in 95.75% of cases. That accuracy, with a laser spot of 0.5 to 1.0 mm, is sufficient for further use of the scans in repairing gas turbine blades. The proposed approach makes it possible to speed up the preparation of technological programs for direct metal deposition by 10 times compared to the manual scanning method.

Computer vision; metal deposition; gas turbine blade repair; scanning of thin surfaces

Citation: Kotlyar D.I., Lomanov A.N. Method of scanning thin surfaces in repairing gas turbine blades. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 4. P. 112-124. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-112-124

References

1. Bezyazychnyy V.F., Smirnov A.V. Analysis and directions of technological and organization problem updating in gas turbine aircraft engine repair. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2020. No. 8 (110). P. 42-48. (In Russ.). DOI: 10.30987/2223-4608-2020-8-42-48
2. Leontev V.A., Zilichikhis S.D., Kondratyuk E.V., Zamkovoy V.E. Restoration of gas turbine engine performance using new technologies and materials. *Vestnik Dvigatelistroeniya*. 2006. No. 4. P. 99-103. (In Russ.)
3. Bessudnov I.A. *Sovershenstvovanie tekhnologiy remonta gazoturbinnnykh aviatsionnykh dvigateley s ispol'zovaniem resursosoberegayushchikh tekhnologiy*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of repair technologies for gas turbine aircraft engines using resource-saving technologies. Ph.D thesis in Engineering Science]. Rybinsk, 2014. 208 p.
4. Galantucci L.M., Piperi E., Lavecchia F., Zhavo A. Semi-automatic low cost 3D laser scanning systems for reverse engineering. *Procedia CIRP*. 2015. V. 28. P. 94-99. DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.016
5. Ahmadi S.A., Mohammadzadeh A., Hosseininaveh A. Introduction of a domestic scanner for 3D object modeling and its evaluation. *1st National Conference on Geospatial Information Technology (January, 19-20 января, 2016, Tehran, Iran)*.
6. Salehi V., Wang S. Using point cloud technology for process simulation in the context of digital factory based on a systems engineering integrated approach. *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design, ICED17 (August, 21-25, 2017, Vancouver, Canada)*. V. 3. P. 11-20.
7. Mutilba U., Gomez-Acedo E., Kortaberria G., Olarra A., Yagüe-Fabra J.A. Traceability of on-machine tool measurement: a review. *Sensors*. 2017. V. 17, Iss. 17. DOI: 10.3390/s17071605
8. Horst J., Hedberg T., Feeney A.B. On-machine measurement use cases and information for machining operations. Report no. 400-1. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2019. 61 p. DOI: 10.6028/NIST.AMS.400-1.
9. Logee S. Quality in manufacturing. On-machine measurement. Available at: <http://www.toolingandproduction.com/qim/1004on-machine.aspx>
10. Dorozhkin I.N., Dorozhkina O.K., Shinkevich I.A. Digital production introduction at the expense of industrial and operational management automation at the industrial enterprise. *Vestnik MSTU «Stankin»*. 2018. No. 2 (45). P. 112-116. (In Russ.)
11. Srinivasan H., Harrysson O., Wysk R. Automatic part localization in a CNC machine coordinate system by means of 3D scans. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. V. 81. P. 1127-1138. DOI: 10.1007/s00170-015-7178-z
12. Zelenskii A.A., Frants V.A., Semenishchev E.A. Trajectory-planning algorithm based on engineering vision in manipulator management. *Russian Engineering Research*. 2020. V. 40, Iss. 1. P. 1-5. DOI: 10.3103/S1068798X20010268
13. Xiong X.H., Chen J.L., Quan D.M. Directly manufacturing mouse mold by plasma deposition manufacturing. *Advanced Materials Research*. 2014. V. 941-944. P. 2190-2193. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.2190
14. Skotheim O., Lind M., Ystgaard P., Fjerdingen S.A. A flexible 3D object localization system for industrial part handling. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (October, 07-12, 2012, Vilamoura-Algarve, Portugal)*. DOI: 10.1109/IROS.2012.6385508
15. Okarma K., Grudzinski M. The 3D scanning system for the machine vision based positioning of workpieces on the CNC machine tools. *Proceedings of the 17th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR) (August, 27-30, 2012, Miedzydroje, Poland)*. DOI: 10.1109/MMAR.2012.6347906

16. Xu X., Zhu D., Zhang H., Yan S., Ding H. TCP-based calibration in robot-assisted belt grinding of aero-engine blades using scanner measurements. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. V. 90. P. 635-647. DOI: 10.1007/s00170-016-9331-8
17. Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Muszyńska M. Robotic grinding process of turboprop engine compressor blades with active selection of contact force. *Technical Gazette*. 2022. V. 29, no. 1. C. 15-22. DOI: 10.17559/TV-20190710141137
18. Kurc K., Burghardt A., Gierlak P., Muszyńska M., Szybicki D., Ornat A., Uliasz M. Application of a 3D scanner in robotic measurement of aviation components. *Electronics*. 2022. V. 11, Iss. 19. DOI: 10.3390/electronics11193216
19. Diao S., Chen X., Luo J. Development and experimental evaluation of a 3D vision system for grinding robot. *Sensors*. 2018. V. 18, Iss. 9. DOI: 10.3390/s18093078
20. Xu J., Xu L., Li Y., Sun Y. Shape-adaptive CNC milling for complex contours on deformed thin-walled revolution surface parts. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. V. 59. P. 760-771. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.001
21. Afonin V.L., Smolentsev A.N., Yakovlev M.G. Intelligent robotic complex for finishing complex surfaces. *Proceedings of the International Scientific and Technological Conference «Extreme Robotics and Conversion Tendencies» (June, 7-8, 2018, Saint-Petersburg, Russia)*. SPb.: Politehnika Servis Publ., 2018. P. 161-170. (In Russ.)
22. Shadrin M.V. *Lazernyy triangulyatsionnyy 3D metod i ustroystvo dlya prototipirovaniya i izgotovleniya slozhnykh izdeliy. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Laser triangulation 3D method and device for prototyping and manufacturing complex products. Ph.D thesis in Engineering Science]. Ryazan, 2020, 194 p.
23. Franca J.G.D.M., Gazziro M.A., Ide A.N., Saito J.H. A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing 2005 (September, 14, 2005, Genova)*. DOI: 10.1109/ICIP.2005.1529778
24. Petrov M.A., Eldib I.S.A. Development of 3D-models of sheet and bulk metal parts, obtained by cold deformation, using optical scanning. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2019. No. 9. P. 471-479. (In Russ.)
25. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Shadrin G.K., Kadyroldina A.T., Kusaiyn-Murat T. Development of a control system for a manipulating industrial robot for 3D surface scanning. *Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University*. 2019. No. 1. P. 81-87. (In Russ.)
26. Busurin V.I., Zhe L., Kudryavtsev P.S. Control of contactless profilometer for scanning surfaces of complex profile. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2022. V. 23, no. 10. P. 529-535. (In Russ.). DOI: 10.17587/mau.23.529-535
27. Losev E.D., Svinarev A.A., Mishurov S.V., Belkina A.V., Stepina A.S. Automation of the restoration of the impeller of the brotherly hydropower plant. *Mechanical Engineers to XXI Century*. 2018. No. 17. P. 169-174. (In Russ.)
28. Meltser-Jokisch T., Thomaidis D., Vil'kenkhener R. *Sposob avtomatizirovannogo remonta detali mashin* [Method of automated repair of machine parts]. Patent RF, no. 2499657, 2003. (Publ. 27.11.2013, bull. no. 33)
29. Wang X., Deng D., Hu Y., Ning F., Wang H., Cong W., Zhang H. Overhang structure and accuracy in laser engineered net shaping of Fe-Cr steel. *Optics & Laser Technology*. 2018. V. 106. P. 357-365. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.04.015
30. Gorbachev V.A., Krivorotov I.A., Markelov A.O., Kotlyarova E.V. Semantic segmentation of satellite images of airports using convolutional neural networks. *Computer Optics*. 2020. V. 44, no. 4. P. 636-645. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-636