Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 42–54.
Cherepovets State University Bulletin, 2022, no. 1 (106), pp. 42–54.

Научная статья
УДК 658.5.012.1
https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-4

Применение технического зрения для сканирования кромки лопатки в процессе ремонта

Дмитрий Игоревич Котляр[1]✉, Алексей Николаевич Ломанов[2], Валерий Сергеевич Корнейчук[3]

[1, 2, 3]Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева,
Рыбинск, Россия,
[1]dm.kotlyar@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-0764-4007
[2]lepss@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9271-1552
[3]korneychuk.valery@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3155-7824

Аннотация. В статье рассматриваются основные подходы к сканированию кромки лопатки для выполнения процесса ремонта деталей аэрокосмической промышленности с применением аддитивных технологий; исследуются базовые методики трехмерного сканирования, выделяются их достоинства и недостатки. Авторами описывается усовершенствованный алгоритм сканирования кромки лопатки, базирующийся на технологии измерения расстояния методом фазового сдвига и системе технического зрения, интегрированной с рабочим инструментом станка.

Ключевые слова: аддитивные технологии, лазерная наплавка металла, техническое зрение, математический аппарат, архитектура программного обеспечения

Для цитирования: *Котляр Д. И., Ломанов А. Н., Корнейчук В. С.* Применение технического зрения для сканирования кромки лопатки в процессе ремонта // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 42–54. https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-4.

The application of computer vision for scanning the blade edge during repair procedures

Dmitry I. Kotlyar[1]✉, Alexey N. Lomanov[2], Valery S. Korneychuk[3]

[1, 2, 3]Rybinsk State Aviation Technical University,
Rybinsk, Russia,
[1]dm.kotlyar@yandex.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-0764-4007
[2]lepss@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9271-1552
[3]korneychuk.valery@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3155-7824

Abstract. The authors consider common techniques for scanning the blade edge during repair procedures in aerospace industry using additive technologies. The article describes common 3D scanning techniques, their pros and cons. The authors focus on the improved algorithm for scanning

© Котляр Д. И., Ломанов А. Н., Корнейчук В. С., 2022

the blade edge based on the phase-shift method and computer vision system integrated with a work tool.

Keywords: additive technologies, laser engineered net shaping, computer vision, mathematical framework, software architecture

For citation: Kotlyar D. I., Lomanov A. N., Korneychuk V. S. The application of computer vision for scanning the blade edge during repair procedures. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 1 (106), pp. 42–54. (In Russ.). https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-4.

Введение

Инновационные возможности аддитивных технологий, применяемых совместно с современными пакетами прикладных программ проектирования и инженерного анализа, позволяют решать сложные инженерные задачи (в особенности – в авиационной отрасли как одном из наиболее приоритетных направлений развития техники)[1].

Наращивание темпов внедрения аддитивных технологий в область авиационного производства оправдано сокращением производственных циклов, повышением экономической эффективности, достижением неизменно высокого качества изготовления, а также гибкостью разработки дизайна будущих компонентов и деталей. Данные технологии формируют условия для перехода промышленности к производству нового поколения, благодаря чему сможет измениться и производственный цикл.

Необходимость проведения данного исследования обусловлена рядом факторов, наиболее важным из которых является отсутствие методов автоматической разработки создания ЧПУ-программ для управления установкой лазерной наплавки металла и визуализации этого технологического процесса. Современные программные решения по адаптивному управлению процессом прямого нанесения металла не решают проблему применения программ управления без участия программиста и пересоздания ЧПУ-программы для каждого отдельного случая.

Исследования, проведенные в ходе данной работы, позволят упростить рабочий процесс операторов установок; минимизировать погрешности при обработке деталей; предотвратить поломку и преждевременный выход из строя оборудования; диагностировать результат построения деталей с помощью аддитивных технологий, включая ремонт изделий, вышедших из строя в процессе эксплуатации.

Основная часть

Проектирование актуальных 3D-моделей современных ремонтируемых деталей представляется важнейшим условием создания программы для ремонта существующих изделий. Решение этой проблемы является ключевым в вопросе сокращения трудоемкости разработки программ управления установкой. Однако только поиска актуальной 3D-модели детали недостаточно.

Вероятность использования идеальной 3D-модели низка, поскольку по факту ремонтируемая деталь имеет существенные отклонения от идеала, полученные в ре-

[1] Кулик В. И., Нилов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники. Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова, 2018. 159 с.

зультате ее эксплуатации. Типовые отклонения фактической детали от ее идеальной модели больше толщины наплавляемого слоя в несколько раз. Это обусловливает серьезную технологическую проблему, состоящую в том, что первый слой не попадает на ремонтируемую деталь и не обеспечивает адгезию. Он проникает либо внутрь существующего металла детали (усугубляя ситуацию для следующих наплавляемых слоев), либо в «газ» – в то место, где металла детали нет. Если во втором случае (при небольших отклонениях) проблема может быть устранена дополнительной насыпкой порошка, то для первого варианта это не подходит.

Задача получения точной программы для станка (в короткие сроки в автоматическом режиме) является важной составляющей в решении проблемы ремонта металлических изделий для аэрокосмической и оборонной промышленности.

Трехмерное сканирование – это процесс, направленный на получение информации об объектах и окружении реального мира, заключающийся в сборе данных о форме объекта и, возможно, его внешнем виде. Собранные в результате этого процесса данные могут быть использованы для создания цифровой трехмерной модели. Существует множество различных технологий для получения информации о форме и внешнем виде объекта. Технологии трехмерного сканирования делятся на две категории: контактные и бесконтактные методы. Результатом такого сканирования является облако точек в трехмерном пространстве, которое в дальнейшем может быть обработано программами для восстановления геометрии объекта в виде сетки треугольников или компьютерной CAD модели.

Контактные методы трехмерного сканирования осуществляют измерение объекта путем физического контакта с ним. Данный способ позволяет достичь высокой точности, которая зависит от точности позиционирования механических частей измерительной машины: десятки и единицы микрометров. Такое сканирование требует механического контакта с объектом в точке измерения, что может в ряде случаев стать причиной появления различных дефектов на объекте измерения. Основной недостаток контактного метода трехмерного сканирования – скорость его выполнения. Контактное сканирование требует физического перемещение датчика, что по сравнению с другими методами происходит достаточно медленно. В то время как самые быстрые контактные сканеры могут анализировать точки изучаемого объекта с частотой в сотни герц, оптические сканеры делают это с частотой от 10 до 500 кГц[1]. Повышение скорости сканирования путем уменьшения количества исследуемых точек в ряде задач является нецелесообразным, поскольку уменьшает итоговую точность сканирования объекта. Координатные измерительные машины включают в себя три основных компонента: базу с по меньшей мере тремя координатными осями; систему фиксации контакта с объектом; систему сбора и хранения данных, объединяющую ЧПУ, компьютер и программное обеспечение.

Бесконтактные методы трехмерного сканирования осуществляют измерение объекта без физического контакта с ним. Они бывают активными и пассивными. Актив-

[1] Vermeulen M. M. P. A., Rosielle P. C. J. N., Schellekens P. H. J. Design of a High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 1998. Vol. 47, iss. 1. P. 447–450.

ные сканеры (их также называют лазерными) излучают свет различных длин волн и детектируют отраженную от объекта часть излучения. Помимо света в качестве активного источника сигнала могут использоваться ультразвук, радиоволны и рентгеновские лучи[1]. Лазерные трехмерные сканеры делят на три категории: времяпролетные, фазового сдвига, триангуляционные.

Время, необходимое пучку света на преодоление дистанции до объекта и обратно, является основой метода измерения расстояния до точки объекта у времяпролетных лазерных сканеров[2]. Поскольку скорость света известна, то время от момента излучения до детектирования отраженного излучения определяет дистанцию до точки измерения. Точность измерения таких сканеров зависит от точности подсчета времени. Свет преодолевает расстояние 1 мм приблизительно за 3,3 пс, поэтому данные сканеры подходят для измерения больших объектов (помещений, зданий и т. п.) с погрешностью в сотни миллиметров.

Лазерные сканеры фазового сдвига работают на принципе сравнения сдвига фазы излученного и принятого сигнала. Измеряемая дистанция может быть вычислена на основании информации о сдвиге фазы сигнала. Максимальный допустимый диапазон измерения для такого сканера определяется как половина от излучаемой длины волны. Точность измерения обусловливается точностью измерения разности фаз сигнала и может быть повышена за счет уменьшения длины волны, что, в свою очередь, приведет к сокращению диапазона измерения.

Принцип, заложенный в основу работы времяпролетного лазерного сканера и лазерного сканера фазового сдвига, позволяет измерить только одну точку объекта. Для сканирования объекта целиком необходимо сдвигать исследуемые точки. Чаще всего такие сканеры оснащают подвижным зеркалом, отклоняющим луч, и системой для вращения объекта вокруг сканера или сканера вокруг объекта.

Лазерная триангуляция – еще один метод активного трехмерного сканирования, в котором используется видимый свет в процессе сканирования объекта[3]. В данном методе лазерный проектор точек подсвечивает объект, а камера, направленная в сторону подсветки объекта, определяет, на каком расстоянии точки расположились на объекте съемки. Указанный метод получил название триангуляция, поскольку лазерный проектор, камера и точка образуют треугольник в пространстве. Следовательно, точность измерения расстояния прямо пропорциональна разрешению камеры и обратно пропорциональна размеру образуемого треугольника и углу обзора камеры и может достигать величин в десятки микрометров[4].

Пассивные сканеры не передают никакого дополнительного сигнала, а воспринимают форму объекта исключительно на основании отраженного от них излучения,

[1] Ebrahim M. A.-B. 3D Laser Scanners' Techniques Overview // International Journal of Science and Research (IJSR). 2015. Vol. 4, iss. 10. P. 323–331.

[2] Середович В. А. и др. Наземное лазерное сканирование. Новосибирск: СГГА, 2009. 261 с.

[3] Шадрин М. В. Лазерный триангуляционный 3D метод и устройство для прототипирования и изготовления сложных изделий: дис. … канд. техн. наук. Рязань: [б. и.], 2020. 194 с.

[4] Черных М. В. Разработка автоматизированного рабочего места оператора 3D-сканера: дипломный проект. Красноярск: [б. и.], 2016. 47 с.

чаще всего – в виде светового потока, но возможно также использование инфракрасного спектра. Пассивные сканеры обычно стоят дешевле, поскольку не требуют дополнительного оборудования и состоят из простых камер.

Пассивные стереоскопические сканеры включают две видеокамеры, расположенные на некотором удалении друг от друга. Они снимают одну сторону объекта под разными углами. Сравнение изображений, полученных с обеих камер, позволяет оценить расстояние до объекта во всех точках изображения, подобно тому, как работает глаз человека.

Фотометрические сканеры работают по тому же принципу, но используют только одну камеру, с которой получают набор снимков, сделанных под разными углами или с различным освещением объекта[1].

Силуэтный сканер делает серию снимков объекта на хорошо контрастирующем фоне и по контуру объекта пытается восстановить его форму. Данная техника подходит только для объектов, имеющих выгнутую форму, без внутренних впадин[2].

Из-за трудностей, возникающих при определении соответствия точек на изображениях, методы пассивного сканирования без модификаций не могут обеспечить достаточную точность 3D-моделей[3]. В случае, когда соответствие установлено, данные методы позволяют однозначно определить расстояние до наблюдаемой точки, поэтому их часто комбинируют с другими системами.

Единым недостатком всех перечисленных методов трехмерного сканирования является отвлеченность результатов сканирования объекта от его физического размещения на рабочем столе. Общая точность трехмерного сканирования определяется как произведение точности сканирования объекта, точности размещения объекта на рабочем столе (положение и ориентация) и точности позиционирования рабочего инструмента.

Для установления координат точек контура наплавки предлагается разработать алгоритм технического зрения. Основным допущением, положенным в основу данного алгоритма, является то, что деталь после ремонта может иметь отклонения в большую сторону (припуск) по внешней геометрии ее контура. Указанное допущение обусловлено тем, что ремонтируемая деталь проходит механическую обработку после напыления на установке.

В процессе ремонта машинное зрение используется для определения в абсолютных координатах контура изъяна закрепленной в оснастке детали. Для этого предлагается разместить на установке дополнительную камеру, которая охватит область кромки лопатки порядка 1600 мм^2, и лазерный измеритель расстояния для вычисления высоты головки над кромкой лопатки и автоматической подстройки фокуса ка-

[1] Овиденко Н. А. Лазерный сканер для измерения объема вещества в резервуаре: магистерская диссертация. Томск: [б. и.], 2018. 127 с.

[2] Гужов В. И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2015. 82 с.

[3] Кузнецов В. А. Исследование метода 3D сканирования, основанного на модели отражения света поверхностью: дис. … канд. техн. наук. Санкт-Петербург: [б. и.], 2018. 128 с.

меры. Камера имеет фиксированное фокусное расстояние, наведение на цель осуществляется путем перемещения головки станка. Алгоритм технического зрения управляет позицией головки и с помощью анализа контура определяет направление следующей его точки. Все точки при последовательном обходе контура образуют первый слой наплавки. Вторичные и последующие слои могут быть вычислены смещением головки по оси *Z* и экспансией контура в плоскости *XY*.

Таким образом, реализация идеи, изложенной выше, позволит установить ремонтируемую деталь в станок, вручную нацелиться на последнюю и первую точки контура изъяна, вызвать программу технического зрения и за короткое время автоматического прохода по точкам контура получить управляющую программу ремонта, которая по команде оператора будет запущена в работу.

При выполнении сканирования детали необходимо держать поверхность по нормали относительно плоскости лазера[1]. Для обеспечения данного требования на каждом участке сканирования вычисляется вектор нормали поверхности и определяются углы наклона (α) и поворота (β) стола.

Расчет нормали поверхности производится по трем точкам. Допустим, даны точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$. Плоскость поверхности описывается уравнением в общем виде $A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0$.

$$\begin{cases} A = y_1 \cdot z_2 - y_1 \cdot z_3 - y_2 \cdot z_1 + y_2 \cdot z_3 + y_3 \cdot z_1 - y_3 \cdot z_2 \\ B = -x_1 \cdot z_2 + x_1 \cdot z_3 + x_2 \cdot z_1 - x_2 \cdot z_3 - x_3 \cdot z_1 + x_3 \cdot z_2 \\ C = x_1 \cdot y_2 - x_1 \cdot y_3 - x_2 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_3 + x_3 \cdot y_1 - x_3 \cdot y_2 \\ D = -x_1 y_2 z_3 + x_1 y_3 z_2 + x_2 y_1 z_3 - x_2 y_3 z_1 - x_3 y_1 z_2 + x_3 y_2 z_1 \end{cases}. \quad (1)$$

Вектор нормали $\bar{n} = \bar{n}(x, y, z)$, где $x = A/L$, $y = B/L$, $z = C/L$, $L = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$.

Углы наклона (α) и поворота (β) стола определяются следующим уравнением:

$$\begin{cases} \alpha_2 = \alpha_1 - \arctan\left(\dfrac{x}{z}\right) = \alpha_1 - \arctan\left(\dfrac{A}{C}\right) \\ \beta_2 = \beta_1 - \arctan\left(\dfrac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right) = \beta_1 - \arctan\left(\dfrac{B}{\sqrt{A^2 + C^2}}\right) \end{cases}. \quad (2)$$

Сканирование кромки лопатки осуществляется посредством системы технического зрения, состоящей из лазерного измерителя расстояния, камеры высокого разрешения и программного обеспечения для обработки сигналов и управления станком (см. рис. 1). Систему технического зрения предполагается разместить на головке рядом с рабочим инструментом и производить сканирование кромки лопатки с помощью этой головки.

[1] 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 and Laser Technology. 2018. Vol. 106. P. 357–365.

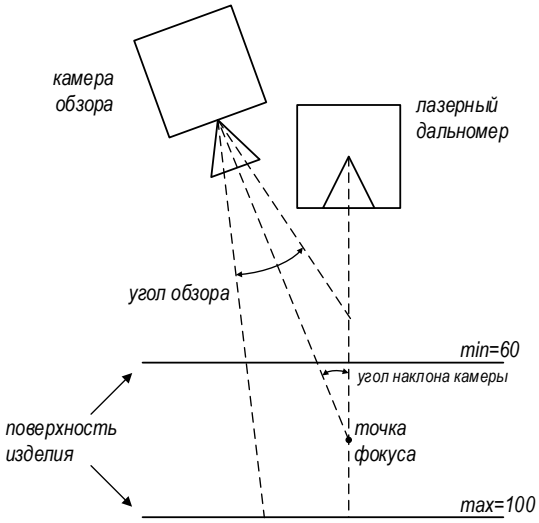


Рис. 1. Структурная схема системы технического зрения

Для проведения процесса сканирования кромки лопатки оператор наводит измерительный инструмент (головку станка) на крайнюю точку зоны сканирования. В данной точке осуществляется выравнивание поверхности детали по нормали и позиционирование кромки лопатки в центр. Выравнивание и позиционирование выполняются с точностью, приемлемой для человека; дальнейшая корректировка будет производиться программно-аппаратным комплексом. Далее оператор наводит измерительный инструмент на начальную точку зоны сканирования и запускает процесс автоматического сканирования лопатки.

Программно-аппаратный комплекс (далее – ПАК) определяет нормаль в точке сканирования, производит фотосъемку и вычисляет ширину кромки лопатки в заданном месте и направление обхода сканирования. Полученные значения сохраняются в памяти ПАК и используются для дальнейшей обработки. После вычисления каждой точки проверяются условия достижения границы сканирования; когда заданное условие выполнено, сканирование останавливается, а результаты могут быть сохранены в файл.

Основную работу выполняет алгоритм вычисления вектора смещения по кромке лопатки. Он определяет положение курсора на изображении с камеры, благодаря чему происходит привязка физических координат станка к координатам изображения.

Вычисление границ кромки лопатки и определение вектора смещения по кромке лопатки реализовано с помощью адаптивного алгоритма. Он работает для случаев, когда найдены обе границы кромки лопатки, а также когда была обнаружена только одна из них. Алгоритм определяет левую и правую кромку, строит до них перпендикулярные линии, вычисляет середину кромки лопатки и направление обхода. Если сканирующая головка отклонилась от середины кромки, то осуществляется мягкая коррекция ее положения. Для случаев, когда была найдена только одна граница

кромки лопатки (для неконтрастных ситуаций), вычисляется перпендикуляр к найденной границе и на основании предыдущих знаний о ширине кромки лопатки в этом месте выполняется мягкая коррекция положения сканирующей головки (вектор обхода при этом совпадает с вектором границы кромки).

Реализация алгоритма сканирования базируется на изначальном положении курсора – центра кромки лопатки, куда направлен луч лазерного измерителя расстояния. Камера и лазерный измеритель расстояния установлены не соосно и под углом друг к другу; следовательно, требуется разработать математическую модель определения центра кромки лопатки на снимке.

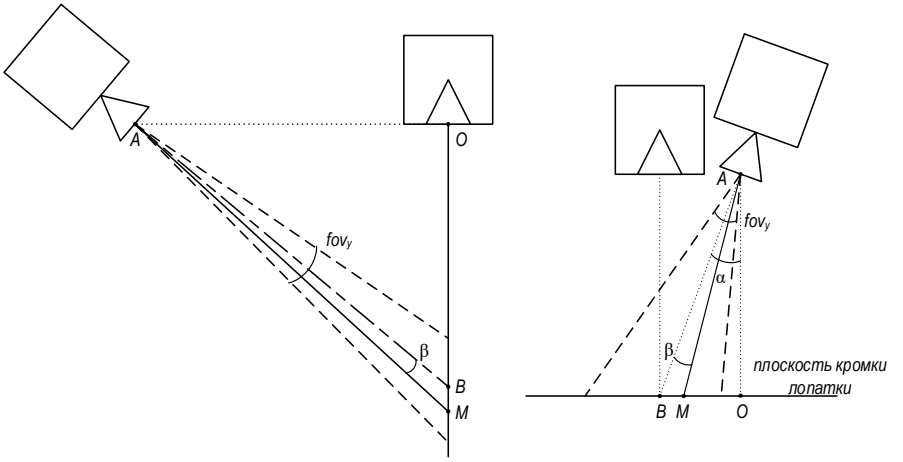
Рассмотрим систему, изображенную на рис. 2а. Допустим, известны расстояние от лазерного измерителя расстояния до кромки лопатки (OM) и относительное положение камеры и лазерного измерителя расстояния; заявлены следующие параметры: точка B находится в центре кадра, кадр имеет размер $W \times H$ пикселей. Задача состоит в том, чтобы найти положение точки $\hat{M}$ на кадре.

Положение точки $\hat{M}$ на кадре вдоль горизонтальной оси совпадает с положением точки $\hat{B}$ при условии, что центр камеры соответствует центру лазерного измерителя расстояния:

$$\hat{M}_x = \hat{B}_x = \frac{1}{2}W \,. \tag{3}$$

Положение точки $\hat{M}$ на кадре вдоль вертикальной оси определяется значением угла β, выраженным в процентном соотношении. Поскольку точка $\hat{M}$ может лежать выше и ниже точки $\hat{B}$ на кадре, выберем положительное значение угла β, когда точка $\hat{M}$ лежит выше точки $\hat{B}$; в таком случае выполняется соотношение $OM < OB$:

$$\beta = \angle OAB - \angle OAM = \arctan\left(\frac{OA}{OM}\right) - \arctan\left(\frac{OA}{OB}\right). \tag{4}$$



а б

Рис. 2. Схематичное изображение поля зрения системы технического зрения:
а – для определения положения курсора в кадре;
б – для определения положения в координатах станка

Принимая во внимание тот факт, что прямая *AB* является биссектрисой угла fov_y по определению, положение точки $\hat{M}$ на кадре вдоль вертикальной оси будет определяться по выражению:

$$y_{\%} = \frac{\frac{fov_y}{2} - \beta}{fov_y} \cdot 100\% = \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{fov_y} \right) \cdot 100\% ; \quad (5)$$

$$\hat{M}_y = y_{\%} \cdot H . \quad (6)$$

Из уравнений (3), (5) и (6) получим координаты курсора (точки *M*) на изображении: $\hat{M}(x, y) = \hat{M}\left(\frac{1}{2}W, \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{fov_y} \right) \cdot H \right)$.

Съемка кромки лопатки происходит после выравнивания поверхности кромки в месте анализа по нормали к лазерному измерителю расстояния. По завершении выполнения данного действия всю поверхность кромки лопатки можно считать плоскостью. Камера и лазерный измеритель расстояния установлены под углом; параметры установки камеры и лазерного измерителя таковы, что точка $\hat{B}$ находится в центре кадра (см. рис. 2б). Известна длина отрезка *AO*, она равна расстоянию от лазерного измерителя расстояния до поверхности кромки лопатки. Необходимо найти положение точки *M* в координатах станка при известных координатах точки $\hat{M}$ на кадре.

Положение точки $\hat{M}$ определяется значением угла β, выраженным в процентном соотношении. Поскольку точка $\hat{M}$ может лежать левее и правее (выше и ниже) точки $\hat{B}$, выберем положительное значение угла β, когда выполняется соотношение

$OM < OB$. Отрезок BM определяет отклонение точки $\hat{M}$ от центра кадра:

$$BM = OB - OM = OA \cdot \tan(\alpha) - OA \cdot \tan(\alpha - \beta); \quad (7)$$

$$BM = OA \cdot (\tan(\alpha) - \tan(\alpha - \beta)); . \quad (8)$$

Ширина кадра по оси X составляет W пикселей, объектив камеры имеет угол обзора fov_x градусов; высота кадра по оси Y – H пикселей, объектив камеры имеет угол обзора fov_y градусов; следовательно, угол β может быть выражен следующим образом:

$$\begin{cases} \beta_x = \left(\hat{M}_x - \hat{B}_x\right) \cdot \dfrac{fov_x}{W} \\ \beta_y = \left(\hat{M}_y - \hat{B}_y\right) \cdot \dfrac{fov_y}{H} \end{cases}. \quad (9)$$

Угол наклона камеры α для оси X обозначим как *pitch*, угол наклона камеры α для оси Y – как *yaw*. На основании представленных выше уравнений вычислим приращение координат:

$$\begin{cases} \Delta_x = OA \cdot \left[\tan(pitch) - \tan\left(pitch - \left(\hat{M}_x - \hat{B}_x\right) \cdot \dfrac{fov_x}{W} \right) \right] \\ \Delta_y = OA \cdot \left[\tan(yaw) - \tan\left(yaw - \left(\hat{M}_y - \hat{B}_y\right) \cdot \dfrac{fov_y}{H} \right) \right] \end{cases}. \quad (10)$$

Отсюда получим координаты точки M в координатах станка как сумму координат базовой точки B и приращения Δ: $M(x, y) = M(B_x + \Delta_x, B_y + \Delta_y)$.

Математическая модель преобразования координат станка в координаты на изображении базируется на обратной ей математической модели. Для нахождения координат точки на изображении необходимо определить угол отклонения β точки M от базовой точки B.

Из математической модели преобразования координат на изображении в координаты станка запишем формулу преобразования в общем виде: $M = B + \Delta$. Согласно этому выражению, представим значение угла отклонения β следующим образом: $\Delta = M - B = h \cdot \left[\tan(\alpha) - \tan(\alpha - \beta) \right]$.

$$\beta = \alpha - \arctan\left[\tan(\alpha) - \frac{M - B}{h} \right]. \quad (11)$$

Угол наклона камеры α для оси X обозначим как *pitch*, угол наклона камеры α для оси Y – как *yaw*. Тогда выражения для вычисления координат точки $\hat{M}(x, y)$ на изображении примут вид:

$$\begin{cases} \hat{M}_x = \hat{B}_x + \beta_x \cdot \dfrac{W}{fov_x} \\ \hat{M}_y = \hat{B}_y + \beta_y \cdot \dfrac{H}{fov_y} \end{cases}. \quad (12)$$

Подставим в выражение (12) значение из выражения (11) и получим формулы для вычисления координат точки $\hat{M}(x, y)$ на изображении:

$$\begin{cases} \hat{M}_x = \hat{B}_x + \left(pitch - \arctan\left[\tan\left(pitch \right) - \dfrac{M_x - B_x}{h} \right] \right) \cdot \dfrac{W}{fov_x} \\ \hat{M}_y = \hat{B}_y + \left(yaw - \arctan\left[\tan\left(yaw \right) - \dfrac{M_y - B_y}{h} \right] \right) \cdot \dfrac{H}{fov_y} \end{cases}. \quad (13)$$

Выводы

В ходе работы были проведены исследование влияния угла наклона поверхности детали (подложки) на обеспечение запроектированной геометрии наплавки металла, изучение влияния расфокусировки лазерного луча на качество наплавки металла, анализ технологий трехмерного сканирования объектов контактным и бесконтактным методами.

В результате анализа технологий трехмерного сканирования были рассмотрены технологии контактного, бесконтактного активного и бесконтактного пассивного сканирования, а также выявлены преимущества и недостатки каждого метода. Общим недостатком всех видов сканирования является отвлеченность результатов сканирования объекта от его физического размещения на рабочем столе установки. Был предложен алгоритм сканирования кромки лопатки, базирующийся на оригинальном методе и бесконтактном методе сканирования с использованием техники фазового сдвига. Реализация данного алгоритма должна повысить точность и скорость сканирования кромки лопатки по сравнению с вышеуказанными методами.

Кроме того, были разработаны математические модели выравнивания поверхности детали по нормали к экструдеру, вычисления положения курсора на кадре (в пикселях), преобразования координат на изображении в координаты станка и обратного преобразования, а также алгоритмы сканирования кромки лопатки.

В дальнейшем планируется определить и обосновать теоретическую точность полученного математического аппарата, оснастить установку необходимым оборудованием и провести серию экспериментальных замеров.

Список источников

Гужов В. И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2015. 82 с.

Кузнецов В. А. Исследование метода 3D сканирования, основанного на модели отражения света поверхностью: дис. … канд. техн. наук. Санкт-Петербург: [б. и.], 2018. 128 с.

Кулик В. И., Нилов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники. Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова, 2018. 159 с.

Овиденко Н. А. Лазерный сканер для измерения объема вещества в резервуаре: магистерская диссертация. Томск: [б. и.], 2018. 127 с.

Середович В. А. и др. Наземное лазерное сканирование. Новосибирск: СГГА, 2009. 261 с.

Черных М. В. Разработка автоматизированного рабочего места оператора 3D-сканера: дипломный проект. Красноярск: [б. и.], 2016. 47 с.

Шадрин М. В. Лазерный триангуляционный 3D метод и устройство для прототипирования и изготовления сложных изделий: дис. … канд. техн. наук. Рязань: [б. и.], 2020. 194 с.

Ebrahim M. A.-B. 3D Laser Scanners' Techniques Overview // International Journal of Science and Research (IJSR). 2015. Vol. 4, iss. 10. P. 323–331.

Vermeulen M. M. P. A., Rosielle P. C. J. N., Schellekens P. H. J. Design of a High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 1998. Vol. 47, iss. 1. P. 447–450.

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 and Laser Technology. 2018. Vol. 106. P. 357–365.

References

Guzhov V. I. *Metody izmereniia 3D-profilia ob"ektov. Kontaktnye, trianguliatsionnye sistemy i metody strukturirovannogo osveshcheniia* [Methods for measuring the 3D profile of objects. Contact, triangulation systems and a light pattern method]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2015. 82 p.

Kuznetsov V. A. *Issledovanie metoda 3D skanirovaniia, osnovannogo na modeli otrazheniia sveta poverkhnost'iu* [Study on the 3D scanning method based on the model for reflection of light by the surface: Cand. thesis in Technical Sciences]. St Petersburg, 2018. 128 p.

Kulik V. I., Nilov A. S. *Additivnye tekhnologii v proizvodstve izdelii aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki* [Additive technologies in the production of aircraft, rocket and space technology products]. St Petersburg: Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet "Voenmekh" imeni D. F. Ustinova, 2018. 159 p.

Ovidenko N. A. *Lazernyi skaner dlia izmereniia ob"ema veshchestva v rezervuare* [Laser scanner for measuring the amount of content in the tank: master's thesis]. Tomsk, 2018. 127 p.

Seredovich V. A. i dr. *Nazemnoe lazernoe skanirovanie* [Terrestrial laser scanning]. Novosibirsk: SGGA, 2009. 261 p.

Chernykh M. V. *Razrabotka avtomatizirovannogo rabochego mesta operatora 3D-skanera* [Development of 3D scanner operator workstation: graduate thesis]. Krasnoiarsk, 2016. 47 p.

Shadrin M. V. *Lazernyi trianguliatsionnyi 3D metod i ustroistvo dlia prototipirovaniia i izgotovleniia slozhnykh izdelii* [Laser triangulation 3D method and device for prototyping and manufacturing complex products: Cand. thesis in Technical Sciences]. Riazan', 2020. 194 p.

Ebrahim M. A.-B. 3D Laser Scanners' Techniques Overview. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015, vol. 4, iss. 10, pp. 323–331.

Vermeulen M. M. P. A., Rosielle P. C. J. N., Schellekens P. H. J. Design of a High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1998, vol. 47, iss. 1, pp. 447–450.

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 and Laser Technology*, 2018, vol. 106, pp. 357–365.

Сведения об авторах

Дмитрий Игоревич Котляр – аспирант; https://orcid.org/0000-0002-0764-4007, dm.kotlyar@yandex.ru, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева (д. 53, ул. Пушкина, 152934 г. Рыбинск, Россия); **Dmitry I. Kotlyar** – Postgraduate student; https://orcid.org/0000-0002-0764-4007, dm.kotlyar@yandex.ru, Rybinsk State Aviation Technical University (53, ul. Pushkina, 152934 Rybinsk, Russia).

Алексей Николаевич Ломанов – кандидат технических наук, доцент; https://orcid.org/0000-0001-9271-1552, lepss@yandex.ru, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева (д. 53, ул. Пушкина, 152934 г. Рыбинск, Россия); **Alexey N. Lomanov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; https://orcid.org/0000-0001-9271-1552, lepss@yandex.ru, Rybinsk State Aviation Technical University (53, ul. Pushkina, 152934 Rybinsk, Russia).

Валерий Сергеевич Корнейчук – аспирант; https://orcid.org/0000-0003-3155-7824, korneychuk.valery@yandex.ru, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева (д. 53, ул. Пушкина, 152934 г. Рыбинск, Россия); **Valery S. Korneychuk** – Postgraduate student; https://orcid.org/0000-0003-3155-7824, korneychuk.valery@yandex.ru, Rybinsk State Aviation Technical University (53, ul. Pushkina, 152934 Rybinsk, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.09.2021; одобрена после рецензирования 14.10.2021; принята к публикации 25.10.2021.

The article was submitted 12.09.2021; Approved after reviewing 14.10.2021; Accepted for publication 25.10.2021.