

## Разработка методики позиционирования изделия при многокоординатной лазерной обработке

А. А. Молотков<sup>1</sup>, Д. Л. Сапрыкин<sup>2</sup>, О. Н. Третьякова<sup>1</sup>, Д. Н. Тужилин<sup>2</sup>, А. А. Шамордин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ, Москва, Россия

<sup>2</sup> Лаборатория промышленных исследований группы компаний НПЦ  
 «Лазеры и аппаратура ТМ», Москва, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается методика видеопозиционирования изделий с криволинейными поверхностями при многокоординатной лазерной обработке. Разработанный функционал позволяет определить позицию нулевой точки чертежа по изображению с промышленной камеры. Основу алгоритма распознавания составляет модифицированный метод поиска в ширину BFS. Введение конвейерной обработки видеопотока с настройкой фильтров и детекторов обеспечивает адаптацию под различные материалы и условия съёмки. Метод позволяет динамически рассчитывать коэффициент пересчёта пикселей в миллиметры, что критически важно при работе с пространственно-сложными поверхностями. Представленное решение повышает точность позиционирования, снижает требования к оснастке и сокращает подготовительное время.

**Ключевые слова:** многокоординатное позиционирование, видеопозиционирование, обработка изображений, конвейер фильтрации, машинное зрение.

### Development of a positioning method for a workpiece in multi-axis laser processing

А. А. Molotkov<sup>1</sup>, Д. Л. Saprykin<sup>2</sup>, О. Н. Tretyakova<sup>1</sup>, Д. Н. Tuzhilin<sup>2</sup>, А. А. Shamordin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow aviation Institute (national research university) MAI, Moscow, Russia

<sup>2</sup> PROMIS LAB of the group of companies “Lasers and Equipment TM”, Moscow, Russia

**Abstract.** The article presents a method for video-based positioning of parts with curved surfaces during multi-axis laser processing. The developed functionality enables the determination of the drawing's zero point position based on images from an industrial camera. The core of the recognition algorithm is a modified breadth-first search (BFS) method. The integration of a configurable video stream processing pipeline with filter and detector tuning ensures adaptability to various materials and imaging conditions. The method allows for dynamic calculation of the pixel-to-millimeter conversion factor, which is critical when working with spatially complex surfaces. The proposed solution improves positioning accuracy, reduces fixture requirements, and shortens production preparation time.

**Keyword:** multi-axis positioning, video positioning, image processing, filter pipeline, machine vision.

### Введение

Данная работа является продолжением и развитием наших исследований [1-7] по разработке программного обеспечения для автоматизации технологических процессов на отечественном лазерном оборудовании с числовым программным управлением. Текущее состояние и перспективы развития технического прогресса во многом определяются применением в различных машинах и механизмах деталей, имеющих криволинейные и пространственно сложные поверхности. К таким деталям относятся, например, лопатки газовых и паровых турбин, крыльчатки, импеллеры и другие. Использование таких сложных по форме рабочих поверхностей расширяет функциональные, технологические и эксплуатационные возможности оборудования.

Производство изделий с пространственно криволинейными поверхностями зачастую состоит из нескольких этапов, часть из которых выполняется на разном технологическом оборудовании. Перемещения заготовки непременно влекут за собой задачу многокоординатного позиционирования, для привязки чертежа, по которому осуществляется обработка к реальному положению изделия. Традиционно задачу позиционирования относительно кинематики станка решают через ощупывания датчиком касания или применения специальных высокоточных оснасток для однозначной установки. Однако не всегда ввиду сложной геометрии эти способы позволяют соотнести чертеж с координатами изделия. Для решения задачи сопоставления программного чертежа при многокоординатной лазерной обработке был разработан функционал по определению позиции нулевой точки чертежа на изделии с криволинейной поверхностью по видеоканалу цифровой камеры.

### Общая информация

Функционал реализован на базе уже существующего программного модуля FlexMV, интегрированного в систему управления. Программный код написан на языке C++ с использованием стандарта C++17 и программной платформы Qt 5.15. Взаимодействие с промышленной камерой осуществляется посредством библиотеки производителя – MvCameraControl. Для упрощения реализации алгоритмов обработки изображений и распознавания применяется библиотека OpenCV, обеспечивающая широкие возможности работы с кадрами в реальном времени. Визуализация видеопотока, а также отображение распознанных объектов выполняются с использованием встроенных средств Qt, предоставляющих интерфейс для работы с графической сценой на основе OpenGL. Благодаря применению кроссплатформенных технологий, система может быть эффективно использована как в операционной среде Windows, так и в Linux.

### Конвейер обработки видеопотока

Разнообразие условий эксплуатации лазерной установки, а также широкий спектр обрабатываемых материалов диктуют необходимость предоставления оператору возможности тонкой настройки не только параметров детектирующих алгоритмов, но и выбора типов фильтров и порядка их применения при обработке входного видеопотока. Для реализации данного функционала в программный модуль FlexMV была интегрирована система конвейерной обработки изображений, разработанная на основе методики, впервые представленной в работе [4] и получившей развитие в [5-6].

Рассматриваемая система оперирует двумя основными типами примитивов. Первый тип — детекторы, представляющие собой алгоритмы, предназначенные для распознавания образов на входном изображении. Второй тип — фильтры, выполняющие предварительную обработку кадров с целью улучшения условий для последующего анализа.

FlexMV предоставляет пользователю средства интерактивной настройки как параметров фильтров и детекторов, так и их последовательности. Это реализовано за счёт визуализации промежуточных результатов обработки, что позволяет оценить влияние каждого этапа конвейера на итоговое изображение. Особое значение имеет порядок применения фильтров, поскольку каждый последующий получает изображение, уже модифицированное предыдущим.

Такая архитектура обработки позволяет эффективно компенсировать вариации физических свойств материалов, которые влияют на визуальное отображение изделия на видеопотоке.

### Общая методика поиска нулевой точки чертежа

В решаемой задаче предполагается, что в качестве нулевой точки чертежа выступает граница на изделии, образованная перепадом высот, или центр отверстия (рис. 1).

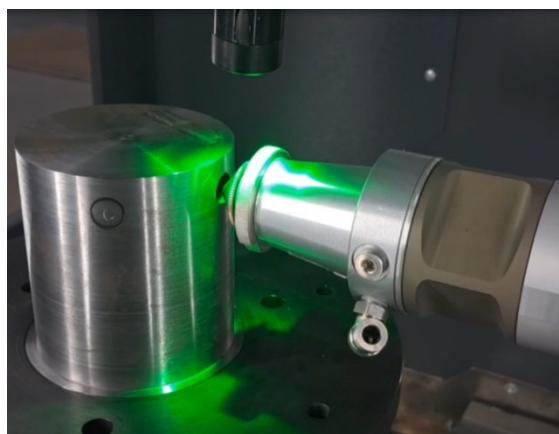


Рис. 1. Тестовый образец – цилиндр с отверстием

Поиск центра состоит из поиска четырёх точек на границы окружности, две точки служат для определения центра по вертикали и две по горизонтали, опустим тривиальный момент поиска центра отрезков и остановимся подробнее на нахождении самой границы. Для осуществления поиска в

предполагаемом месте нахождения границы запускается детектор распознавания (BorderDetector) и начинается движение по заданной оси в заданном направлении, цель этого – первичное (грубо) определение положения края. При обнаружении детектором границы необходимо переместиться таким образом, чтобы сопло лазерной установки оказалось ровно над ней, для этого нужно уточнить координаты распознанного объекта. Для того чтобы сопоставить координаты в пикселях изображения с координатами кинематической системы станка, необходимо рассчитать коэффициент пересчёта (pxToMm). При этом коэффициент pxToMm в задаче многокоординатного позиционирования при обработке деталей с пространственно-криволинейными поверхностями не получится рассчитать один раз заранее ввиду разного сечения, образованного пересечением фокальной плоскости с поверхностью изделия при движении. Таким образом, pxToMm необходимо рассчитывать по месту, для каждой обнаруженной границы. Для расчёта необходимо путём перемещения получить координаты распознанной границы на краях области видимости (рис. 2), в пикселях на изображении и миллиметрах от кинематики. После получения необходимых данных коэффициент рассчитывается как изменение позиции в миллиметрах, делённое на изменение позиции в пикселях:

$$pxToMm = \frac{secondPosMm - firstPosMm}{secondPosPx - firstPosPx}.$$

Таким образом, для успешного сопоставления чертежа с изделием складывается методика, при которой оператору необходимо определить конвейер обработки видеопотока и параметры перемещений поиска края.

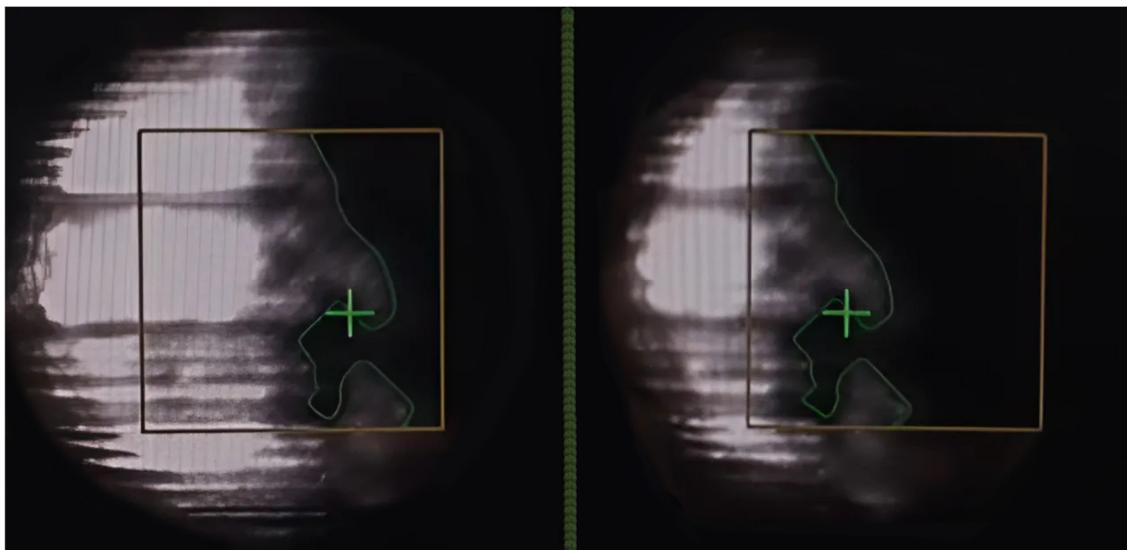


Рис. 2. Распознавание границы на краях области видимости для расчёта pxToMm

### Распознавание края BorderDetector

Представленный алгоритм реализует метод поиска границ объектов на изображении с использованием модифицированного поиска в ширину (BFS) с последующим восстановлением пути до границы. Алгоритм состоит из двух основных этапов:

1. *Построение карты расстояний.* Исходное изображение преобразуется в матрицу расстояний, где каждому пиксели присваивается значение, соответствующее его удалённости от начальной точки. Для этого применяется следующий подход: инициализируется матрица размером с исходное изображение, заполненная значением -1, обозначающим «непосещённые» пиксели. Пиксели, яркость которых ниже заданного порога, маркируются как -2, исключая их из дальнейшего анализа. Из начальной точки запускается волновой алгоритм: на каждом шаге соседние пиксели (окрестность  $3 \times 3$ ) помечаются значением, равным текущей глубине поиска. Процесс продолжается до достижения границы изображения или исчерпания допустимого числа итераций.

2. *Восстановление пути до границы.* После обнаружения граничного пикселя выполняется обратный проход по карте расстояний: алгоритм последовательно переходит к соседним пикселям с

меньшим значением глубины поиска, формируя траекторию до исходной точки. Координаты всех промежуточных точек сохраняются в массив, который в дальнейшем используется для визуализации рисунка 1 или расчёта положения границы.

Для повышения устойчивости алгоритма граничные пиксели изображения проверяются в первую очередь, что позволяет быстро обнаруживать контуры объектов, пересекающие рамку кадра. Предварительное исключение тёмных пикселей сокращает область поиска и уменьшает влияние шумов.

Коэффициент пересчёта  $pxToMm$  корректируется для каждой обнаруженной границы, что обеспечивает точность позиционирования даже при изменении масштаба изображения из-за криволинейности поверхности.

### Преимущества и недостатки

Разработанный метод позиционирования на основе обработки изображений с промышленной камеры позволяет существенно повысить точность сопоставления чертежа с реальным положением детали на станке в ситуации, когда применение классических методов не представляется возможным.

Адаптивность к сложным поверхностям – динамический пересчёт коэффициента  $pxToMm$  обеспечивает точность даже при работе с криволинейными и пространственно неоднородными поверхностями. Гибкость настройки обработки изображений – возможность выбора и настройки фильтров и детекторов позволяет адаптировать алгоритм под различные материалы и условия освещения.

Однако метод имеет и ряд ограничений: зависимость от условий съёмки – неравномерное освещение, блики или низкая контрастность могут снижать точность распознавания границ. Необходимость предварительной настройки – оператор должен вручную подбирать параметры фильтрации и детектирования для каждого типа поверхности.

### Заключение

Внедрение алгоритма видеопозиционирования позволило решить задачу сопоставления чертежа с деталью при многокоординатной лазерной обработке в ситуации, где реперами выступают границы, образованные перепадом высот. Применение модифицированного BFS-алгоритма *BorderDetector* для распознавания границ обеспечивает высокую точность даже при работе с криволинейными поверхностями. Таким образом, предложенное решение не только повышает точность позиционирования, но и сокращает время подготовки производства, что особенно важно при обработке сложных деталей в отечественных авиационной, энергетической и других высокотехнологичных отраслях.

### Список литературы

1. Molotkov A.A., Tretiyakova O.N. On possible approaches to visualizing the process of selective laser melting // Scientific Visualization. 2019. Vol. 11, no. 4. Pp. 1-12.
2. Молотков А.А., Третьякова О.Н. Применение машинного зрения в лазерных технологиях // Труды МАИ: электронный журнал. 2022. № 127.
3. Molotkov A.A., Tretiyakova O.N., Tuzhilin D. N. About development and application of a software platform for machine vision for various laser technologies // Scientific Visualization. 2022. No. 5. Pp. 108-118.
4. Молотков А.А., Третьякова О.Н. Применение методов машинного зрения и математического моделирования для разработки технологий создания электронных приборов // Приборы. 2022. № 4. С. 55-58.
5. Разработка комплекса программ для создания промышленного лазерного технологического оборудования / А.А. Молотков, Д.Л. Сапрыкин, О.Н. Третьякова, Д.Н. Тужилин // Приборы. 2022. № 5. С. 15-22.
6. Молотков А.А., Третьякова О.Н. Отработка технологических режимов при создании SLM технологии // Приборы. 2023. № 8. С. 44-47.
7. Tretyakova O.N., Tuzhilin D.N., Shamordin A.A. Research and Application of Machine Vision Algorithms for Defect Detection in Additive Technologies // Scientific Visualization. 2025. Vol. 17, no. 1. Pp. 114-121.