

---

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

---

УДК 62-50:004.057.8

Н.А. Кротова, Р.Л. Пушков  
N.A. Krotova, R.L. Pushkov

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ОРИЕНТАЦИИ ЗАГОТОВКИ НА СТАНКЕ С ПРИМЕНЕНИ- ЕМ АЛГОРИТМОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

## DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS AND ORIENTATION OF THE WORKPIECE INSIDE THE MACHINE- TOOL USING COMPUTER-VISION ALGORITHMS

*В работе изложено исследование современных алгоритмов технического зрения и предложено их применение для определения геометрических параметров и ориентации заготовки, находящейся в рабочей зоне станка. Разработан алгоритм применения технического зрения на основе стереопары снимков рабочей зоны и проведено их тестирование с целью определения погрешностей измерения.*

*The paper describes a research of modern algorithms for computer technical vision and proposes their application to determine the geometric parameters and orientation of the workpiece inside the working area of the machine-tool. An algorithm for the use of computer technical vision based on a stereopair of images of the working area was developed and tested to determine the measurement errors.*

**Ключевые слова:** техническое зрение, компьютерное зрение, система координат заготовки, система координат станка, определение контура, обработка изображений, стереозрение, ЧПУ, станок.

**Keywords:** technical vision, computer vision, workpiece coordinate system, machine-tool coordinate system, determining of contour, image processing, stereovision, CNC, machine-tool.

### Введение

Перед началом процесса обработки заготовки на станке необходимо произвести привязку установленной в рабочей зоне заготовки к системе координат системы числового программного управления. Способы привязки выбираются в зависимости от требований к геометрии детали, точности обработки, а также технических возможностей оборудования. Наиболее точными методами являются применение щупов и автоматизированных измерительных систем. Однако подобные системы достаточно дороги и редко устанавливаются на простые фрезерные или токарные станки. На таких станках привязка производится при помощи таких методов, как торцевание, точение по наружному диаметру, обкатка индикатором. Подобные методы требуют непосредственного участия оператора в процессе привязки заготовки к системе ко-

ординат ЧПУ, что ограничивает применение простых станков в автоматизированных линиях и безлюдных производствах. Применение алгоритмов технического зрения для определения положения заготовки в рабочей зоне станка может ускорить автоматизировать процесс привязки заготовки к системе координат ЧПУ [1, 2].

Системы технического зрения сегодня — это эффективный и доступный инструмент для модернизации производства, применение которого позволяет решать широкий спектр промышленных задач, и в сравнении с традиционными способами решения они часто оказываются проще, быстрее и дешевле.

Системы технического зрения в машиностроении могут заменять или дополнять проведение измерений вручную, решая одну или сразу несколько классических задач [3]:

- 1) определение положения объекта;
- 2) измерение габаритов объекта;
- 3) контроль качества;
- 4) распознавание маркировки.

Для определения положения и ориентации заготовки предлагается создать систему, решающую первые две задачи, и автоматизировать определение нулевой точки заготовки в системе координат станков, не оснащенных автоматизированными средствами измерений.

Большинство существующих систем технического зрения, решающих подобные задачи, или получают изображение с единственной камеры и используют явление перспективных преобразований, или организованы по схеме стереоскопического зрения. Установлено, что величина погрешности определения расстояния до объекта при расстояниях наблюдения около 2 м гораздо меньше для второго типа систем [4] (рис. 1), к тому же, такой метод измерений не требует знать точное положение системы камер относительно системы координат станка и размеры исследуемого объекта. При этом погрешность определения контуров объекта в плоскости изображения линейно зависит от размеров захватываемой камерой области, приходящейся на пиксель изображения, и обратно пропорциональна его разрешению [5].

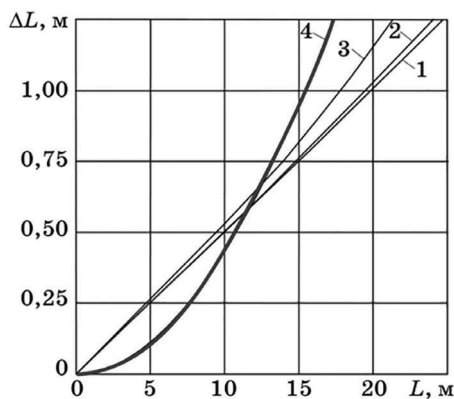


Рис. 1. Сравнение погрешностей при анализе одного изображения (кривые 1, 2, 3) и двух (кривая 4)

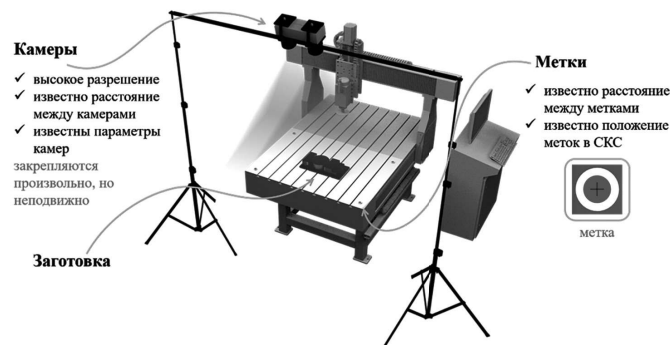


Рис. 2. Установка, демонстрирующая расположение элементов системы технического зрения

### Выбор способа получения и схемы обработки снимков рабочей области

На основании проведенного анализа принято решение использовать систему из двух камер высокого разрешения. Вычисления геометрических параметров заготовки, установленной на станке, производятся на основе анализа стереопар снимков рабочей области станка, полученных с пары сонаправленных камер, жестко закрепленных относительно друг друга так, что известно расстояние  $a$  между центрами их объективов. Такая установка позволяет имитировать бинокулярное зрение, что не требует знания точного положения самой установки относительно нуля станка, поскольку вычислять её положение можно относительно специальных меток на рабочем столе оснащаемого установкой станка, координаты которых в системе координат станка известны.

Установка, демонстрирующая возможный вариант расположения элементов системы технического зрения, приведена на рис. 2.

Для уменьшения погрешностей изменений необходимо предъявить некоторые требования к аппаратной части системы. Для камер это неподвижность закрепления относительно друг друга и относительно станка во временном интервале между получением основной и вспомогательной стереопар, минимально возможная высота их размещения над столом.

Поскольку необходимо обнаружить на входной стереопаре область с заготовкой, перед ее установкой на станок необходимо получить вспомогательную стереопару снимков пустого стола. После установки заготовки получают основную стереопару снимков. В случае, если естественное освещение в помещении непостоянно или в кадр попадают тени движущихся частей другого оборудования, необходимо использовать дополнительную подсветку.

Предполагается, что метки в кадре будут расположены в разных четвертях изображения, чтобы каждая была близка к соответствующему углу изображения (рис. 3).

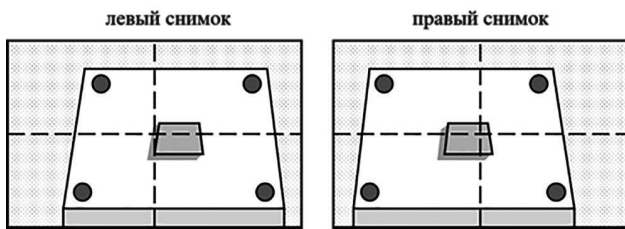


Рис. 3. Предполагаемое расположение меток на снимках стереопар

Для уменьшения возможных погрешностей измерений камеры необходимо закрепить так, чтобы угол между их зрительными осями и нормалью стола станка стремился к нулю. (положение Б на рис. 4а). В этом случае перспективные искажения изображений стереопар будут минимальными, что уменьшит погрешность, вносимую в измерение при перспективной коррекции изображений.

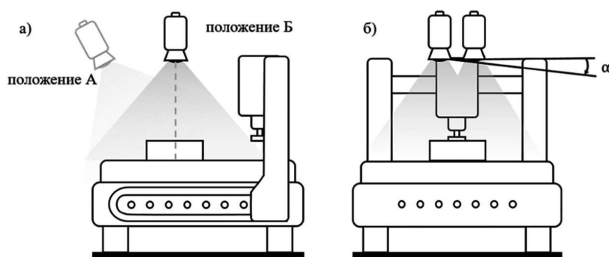


Рис. 4. Предполагаемое расположение камер над столом станка

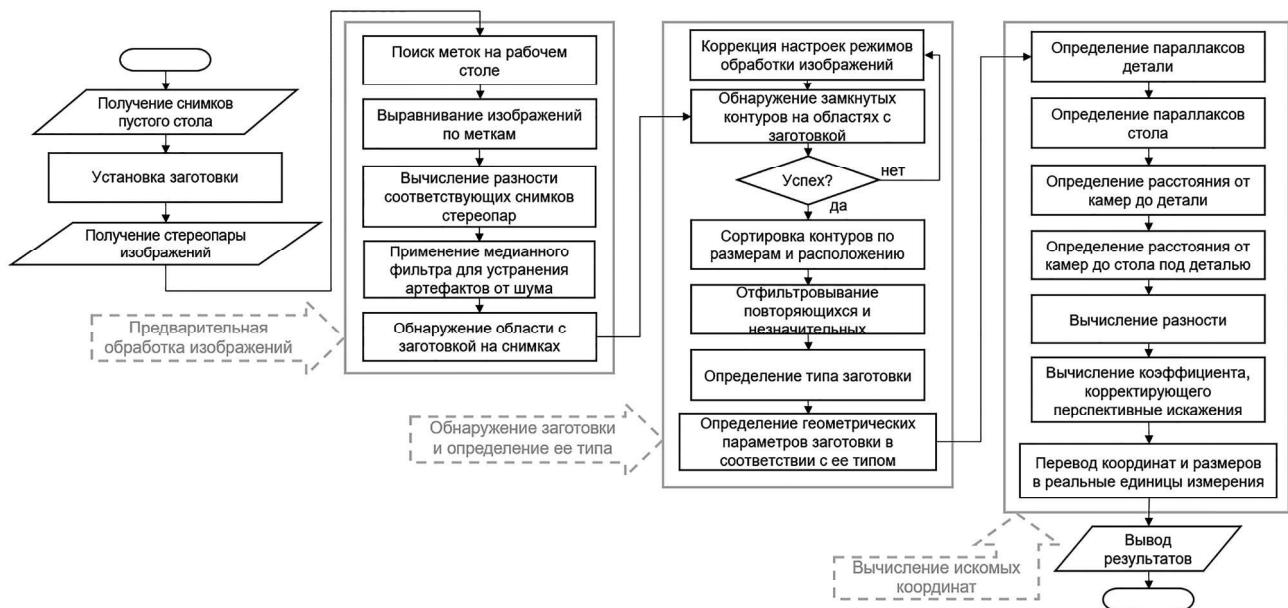


Рис. 5. Алгоритм определения положения и ориентации заготовки

Наилучший способ установки камер — это закрепление системы на горизонтальной штанге, установленной на двух штативах (рис. 2). При таком варианте установки необходимо убедиться, что не произойдет наклон камер, в результате которого одна камера окажется выше другой (рис. 4б).

**Разработка алгоритма определения положения и ориентации заготовки**

Алгоритм определения положения и ориентации заготовки (рис. 5) основывается на поиске контуров заготовки на изображениях с камер и вычислении их смещений.

На этапе предварительной обработки на основании разностей соответствующих снимков основной стереопары со вспомогательной определяются области, изменившиеся на снимках после установки заготовки. Обнаруживаются метки, расположенные на столе, и снимки выравниваются по ним так, чтобы скорректировать перспективные искажения. Определяются координаты нулевой точки станка в пикселях для обоих изображений основной стереопары и коэффициенты соответствия пикселей миллиметрам для уровня поверхности стола станка.

В результате предварительной обработки получаются только области выровненных изображений фрагментов стола с заготовкой. Это позволяет упростить расчеты на следующем этапе и ускорить его проведение.

На втором этапе производится поиск контуров объектов при этом обрабатываются только области с заготовкой снимков основной стереопары. Обнаруживаются контуры прямоугольников и окружностей, и отфильтровываются лишние. Результат этой опе-

рации зависит от контрастности и яркости исходных изображений. В случае невозможности обнаружения контуров производится коррекция параметров изображения и операция повторяется. После фильтрации определяется тип заготовки и набор ее контуров передается на следующий этап. В данный момент алгоритм распознает только простейшие заготовки – прямоугольные и цилиндрические, но в дальнейшем возможно расширение его функциональных возможностей.

На третьем этапе определяются расстояния от камер до стола и до поверхности заготовки. В расчетах используются найденные на первом этапе метки на рабочем столе и набор контуров и коэффициенты соответствия, найденные на втором этапе.

Расстояние определяется следующим образом: нам известно расстояние  $a$  между камерами, величина разрешения изображений, получаемых с камер  $X \times Y$  и их вертикальный и горизонтальный углы обзора  $A$  и  $B$  и необходимо вычислить расстояние  $d$  (рис. 6).

Точка  $O$  на схеме – центр исследуемого объекта. Известное расстояние  $a$  связано с углами и расстоянием  $d$  соотношением (1).

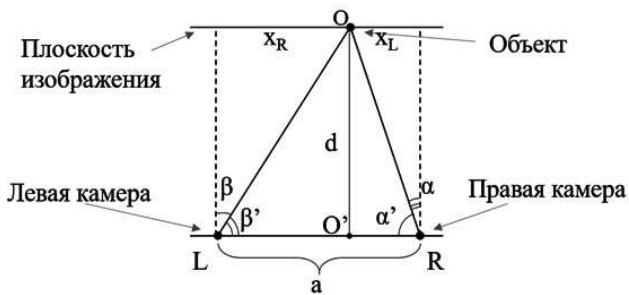


Рис. 6. Схема определения расстояния до объекта, которому принадлежит точка  $O$

$$a = \frac{d}{\operatorname{tg}(\beta')} + \frac{d}{\operatorname{tg}(\alpha')} \quad (1)$$

Углы  $\alpha$  и  $\beta$  вычисляются при помощи соотношений (2) и (3):

$$\frac{X}{2} \cdot \frac{1}{x} = \operatorname{tg}(A) \Rightarrow x = \frac{X}{2\operatorname{tg}(A)}; \quad (2)$$

$$\alpha = \operatorname{atan}\left(\frac{x_R}{x}\right); \beta = \operatorname{atan}\left(\frac{x_L}{x}\right). \quad (3)$$

Вычитая их из  $90^\circ$  получаем  $\alpha'$  и  $\beta'$  и подставляем в соотношение (1) и выражаем искомое расстояние  $d$  (4):

$$d = \frac{a}{\frac{1}{\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)} + \frac{1}{\operatorname{tg}(90^\circ - \beta)}} \quad (4)$$

С помощью найденных расстояний от камер до стола и от камер до заготовки корректируются искажения, приведенные на рис. 7. Коэффициенты соответствия пикселей миллиметрам для уровня поверхности стола корректируются, умножаясь на отношение высоты камер над столом к высоте камеры над заготовкой, так как видимый на снимке размер относится к реальному размеру в той же пропорции.

При съемке контур заготовки проецируется на плоскость изображения, и происходит его «растягивание». Из рис. 7 видно, что смещение  $dx$  пропорционально смещению точки  $X$  относительно зрительной оси камеры и его значение можно найти по формуле (5).

$$dx = (X - H) \frac{h}{d} \quad (5)$$

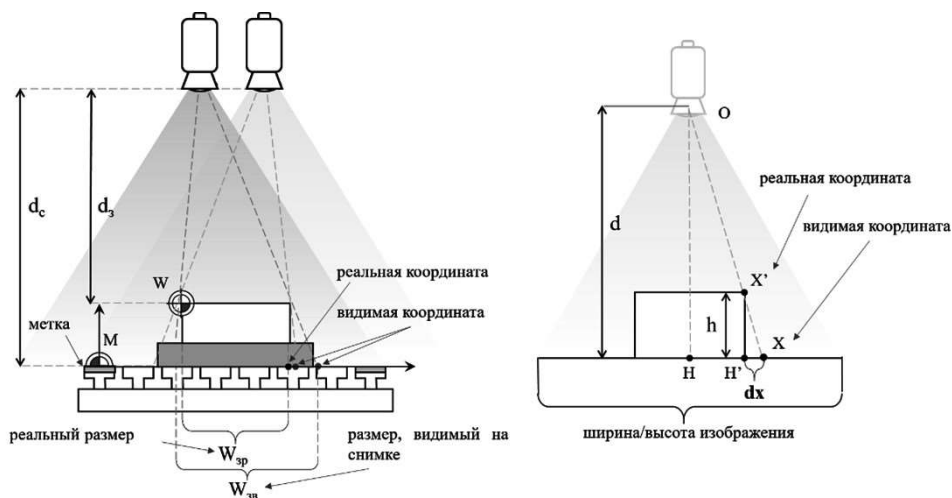


Рис. 7. Основные искажения

После того, как будут обработаны все ключевые точки контуров с «левого» и «правого» изображений, результаты усредняются и выводятся на экран и в дальнейшем могут передаваться системе ЧПУ станка.

### Проведение тестирования алгоритма

Для проведения тестирования алгоритма было разработано тестовое приложение на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV [6].

Тестирование проводилось на изображениях трехмерной модели фрезерного стола с нанесенными на него метками. Разрешение входных изображений составляет 5120×2880 пикселей. Метки образуют прямоугольник с длинной стороной 900 мм и короткой — 600 мм.

Обрабатывались изображения прямоугольных и цилиндрических заготовок при различных способах установки камер над столом станка. Пример полученного результата для цилиндрической заготовки приведен на рис. 8.

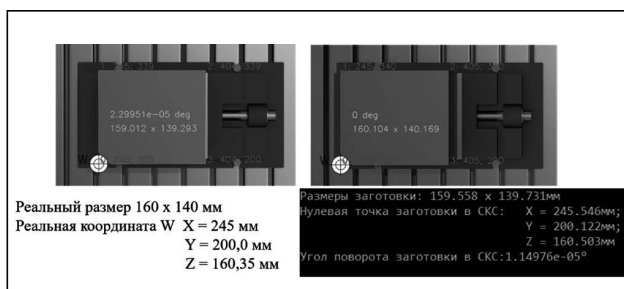


Рис. 8. Пример выходных данных модуля

Погрешность вычисленных размеров имеет разброс величин 0,2–0,6 мм. Скорость работы алгоритма (от начала анализа входных изображений до получения результатов) составляет от 4 до 10 секунд.

### Вывод

Полученные результаты тестирования позволяют сделать вывод, что разработанный алгоритм определения положения и ориентации заготовки на базе системы технического зрения даёт возможность получить результаты по точности, сопоставимые с методами торцевания или наружного точения, при существенном повышении скорости получения результирующих параметров и практически полном исключении оператора из процесса. Это позволяет повысить уровень автоматизации производства.

### Библиографический список

1. Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Мартинова Л.И. Построение специализированной системы ЧПУ для многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центров: статья // Автоматизация в промышленности, № 6, 2014. С. 25–28.
2. Мартинов Г.М., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В. Основы построения однопьютерной системы ЧПУ с программно реализованным ядром и открытой модульной архитектурой: статья // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 4. С. 82–93.
3. SICK IVP Machine Vision Introduction [Электронный ресурс] // 2006. — Режим доступа: [https://www.academia.edu/38693358/Machine\\_Vision\\_Introduction2\\_2\\_web](https://www.academia.edu/38693358/Machine_Vision_Introduction2_2_web).
4. Красильников Н.Н. Механизмы и погрешности восприятия 3d-пространства зрительной системой: статья // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6. С. 13–19.
5. KEYENCE Dimension Measurement [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.keyence.com/ss/products/vision/visionbasics/use/inspection03>.
6. OpenCV Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://opencv.org>

**Кротова Наталья Алексеевна** — студентка гр. АДБ-17-06 ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
natalilia1900@gmail.com

**Пушков Роман Львович** — канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
pushkov@ncsystems.ru

**Krotova Nataliya Alexeyevna** — student of group ADB-17-06 of MSUT «STANKIN»  
natalilia1900@gmail.com

**Pushkov Roman Lvovich** — candidate Sc. of Engineering, assistant professor of the sub-department of «Numeric Control Systems» of MSUT «STANKIN»  
pushkov@ncsystems.ru