

*Научная статья*

УДК 621.865.8:005

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 16–25.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 16–25.

*А.Ю. Поливанов* ✉, *Ю. Дабул*

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

✉ Автор для корреспонденции

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ СВАРОЧНЫХ СТЫКОВ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТА ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

### Аннотация

Сварка — это технологический процесс создания неразъемных соединений путем создания межатомных связей между компонентами при их нагревании, пластическом деформировании или комбинации этих двух факторов. Сварка является разновидностью сборочной операции и позволяет создавать неразъемные соединения. Она получила широкое распространение благодаря своей простоте и высокой скорости соединения деталей. Сварка является высокопроизводительным и экономически выгодным технологическим процессом, который используется во многих областях машиностроения. Процесс сварки необходимо автоматизировать. Автоматизированная сварка — это автоматизированный процесс, выполняемый с помощью специальных роботов и другого сварочного оборудования. Процесс сварки, выполняемый с помощью робота — роботизированная сварка — имеет ряд преимуществ, в том числе высокое качество готовых изделий и высокую производительность производства.

Кроме того, важным преимуществом роботизированной сварки является её точность. Погрешность позиционирования сварочной горелки современных роботов для сварки составляет 0,03–0,05 мм, что достаточно для большинства задач. Тем не менее, при жёстком программировании робота (без адаптации) погрешность позиционирования может достигать 0,5 мм и более. Для уменьшения погрешности необходимо использовать методы коррекции сварочной траектории, основанные на измерении координат сварочного стыка с помощью системы технического зрения (СТЗ). Коррекция траектории позволит обеспечить качество сварного изделия, но при этом может снизиться скорость сварки. Поэтому, для обеспечения требуемой точности сварки и сохранения приемлемой скорости, требуется разработка эффективных методов определения координат стыков сварных соединений с помощью технического зрения в составе робота для дуговой сварки.

**Ключевые слова:** система технического зрения, дуговая сварка, робот, стык.

**Для цитирования:** Поливанов А.Ю., Дабул Ю. Методика определения координат сварочных стыков в системе технического зрения робота для дуговой сварки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 16–25.

*A.Yu. Polivanov* ✉, *Yu. Daboul*

MSUT “STANKIN”

✉ Corresponding author

## A METHOD OF DETERMINING THE COORDINATES OF WELDING JOINTS IN THE ROBOT’S TECHNICAL VISION SYSTEM FOR ARC WELDING

### Abstract

Welding is a technological process of creating permanent joints by creating interatomic bonds between components when they are heated, plastic deformed, or a combination of these two factors. Welding is a type of assembly operation; it allows you to create permanent joints. It has become widespread due to its simplicity

and high speed of connecting parts. Welding is a high-performance and cost-effective technological process that is used in many areas of mechanical engineering. The welding process must be automated. Automated welding is a fully automated process performed with the help of special robots and other welding equipment. Robot welding has a number of advantages, including high quality of finished products and high production productivity. In addition, an important advantage of robotic welding is its accuracy. The positioning error of the welding torch of modern welding robots is 0.03–0.05 mm, which is sufficient for most tasks. However, with hard programming of the robot (without adaptation), the positioning error can reach 0.5 mm or more. To reduce the error, it is necessary to use methods for correcting the welding trajectory based on measuring the coordinates of the welding joint using a vision system. Correction of the trajectory will ensure the quality of the welded product, but at the same time the welding speed may decrease. Therefore, in order to ensure the required welding accuracy and maintain an acceptable speed, the task arises to develop effective methods for determining the coordinates of the joints of welded joints using technical vision as part of an arc-welding robot.

**Keywords:** computer vision system, arc welding, robot, joint.

**For citation:** Polivanov A. Yu., Daboul Yu. A method of determining the coordinates of welding joints in the robot's technical vision system for arc welding. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2025. No 1 (72). P. 16–25. (In Russian)

### Роботизированный технологический комплекс для дуговой сварки

#### Способы определения координат стыков сварного соединения

Большим преимуществом роботизированной сварки является её точность. Точность позиционирования сварочной горелки современных роботов для сварки составляет 0,03–0,05 мм, что достаточно для большинства задач сварки [14].

Тем не менее, при жёстком программировании робота (без адаптации), погрешность позиционирования может достигать 0,5 мм и более. Чтобы достичь необходимой точности позиционирования, обычно используют дорогостоящую оснастку для фиксации свариваемых элементов. Другой способ обеспечения нужной точности – коррекция сварочной траектории на основе определения координат сварочных стыков с помощью сенсорной системы.

Сенсоры для сварки в настоящее время варьируются от экономичных электродных сенсорных датчиков до новейших лазерных систем и систем технического зрения (рис. 1) [13]. Они отличаются скоростью и точностью определения координат стыков.

Датчик прикосновения через электрод (рис. 1а) эффективен для всех токопроводящих металлов и обеспечивает экономичное обнаружение швов.

Бесконтактные лазерные системы (рис. 1б) обеспечивают быстрое и точное обнаружение швов, исключая разрывы или надломы сварочной проволоки. Эти системы являются экономически эффективным вариантом между решениями тактильного и визуального контроля.

Датчик тока и напряжения сварочной дуги (рис. 1в) позволяет отслеживать шов по дуге во время сварки и совместим с оборудованием любых роботов, в том числе оснащённых другими сенсорными системами слежения за траекторией сварки.

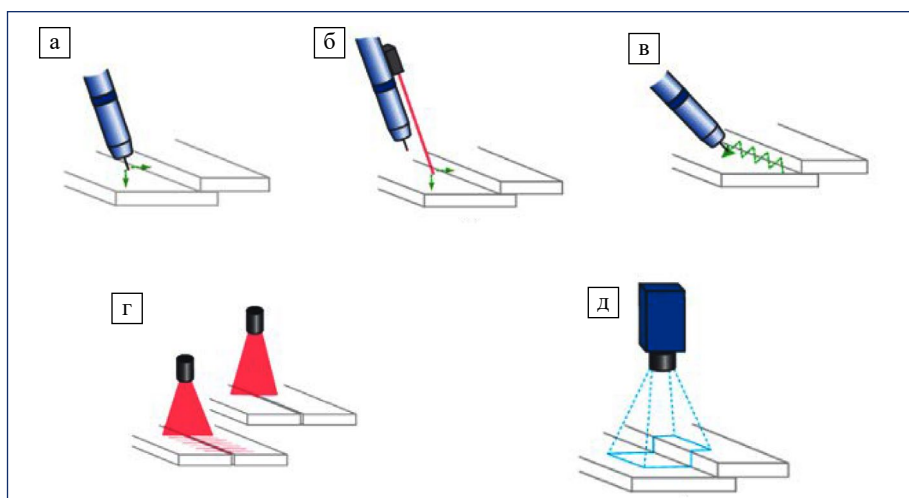


Рис. 1. Сенсорные технологии определения места сварки [13]

Лазерный поиск и отслеживание (*рис. 1з*) используется для различных материалов и условий освещения, а также для получения данных о зазорах в стыках и коррекции траектории сварки в реальном времени на основе обратной связи по зазорам в стыках

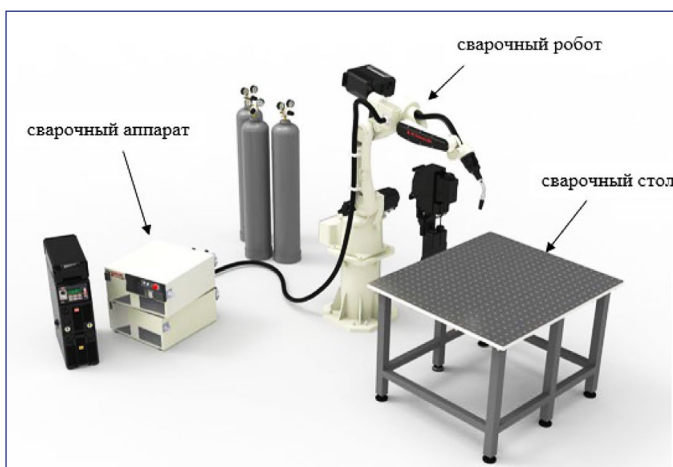
СТЗ (*рис. 1в*) позволяет идентифицировать сварочный стык и определить его координаты бесконтактным способом, и является наиболее перспективными сенсoram. СТЗ также может оценивать качество сварочного шва после сварки.

Как правило, в одном сварочном робототехническом комплексе используется несколько способов отслеживания места сварки. Датчики прикосновения через электрод совместно с датчиком тока сварочной дуги являются минимальной стандартной конфигурацией [13]. Далее, в зависимости от решаемых технологических задач и бюджета заказчика, сварочный робот оборудуется лазерным дальномером или системой технического зрения (или и тем и другим одновременно). Таким образом, сенсорные системы сварочного робота дополняют друг друга и позволяют гибко решать задачи определения и коррекции траектории сварки.

### **Структура робототехнического комплекса дуговой сварки**

#### *Состав робототехнического комплекса для сварки*

Роботизированный комплекс сварки представляет собой систему, состоящую из многих частей, начиная от манипулятора робота и его системы управления и заканчивая системами, которые помогают управлять роботом и обслуживать его.



**Рис. 2. Базовое решение для роботизированного сварочного комплекса**

Как показано на *рис. 2*, минимальный состав роботизированного сварочного комплекса:

- сварочный робот;
- сварочный аппарат;
- сварочный стол с набором оснастки.

В зависимости от условий сварки, робототехнический комплекс может дополнительно оснащаться следующими компонентами:

- устройство, позволяющее деталям вращаться в разных плоскостях, например, одно- или двухосевые вращатели, кантователи или другие роботы;
- устройство, предназначенное для очистки горелки;
- сенсорные системы используются для поиска свариваемых компонентов, определения стыков, наблюдения за швом во время сварки и корректировки траектории сварки;
- система вентиляции;
- линейные двигатели, которые управляют движением робота или заготовки;
- программное обеспечение для программирования оффлайн.

Для сварки могут использоваться антропоморфные роботы с пятью или шестью степенями подвижности.

Роботизированные комплексы также включают оборудование для очистки горелки, вентиляции и защитных барьеров, а также оборудование для позиционирования и перемещения изделий.

В процессе сварки брызги прилипают к горелке и загрязняют её, что нарушает процесс. Кроме того, капля, образующаяся на конце электрода, мешает дальнейшему зажиганию дуги. Таким образом, горелку необходимо регулярно чистить. Что-

бы выполнить эту задачу, роботизированные установки оборудуются станциями очистки горелки. Они удаляют брызги из сопла с помощью специальной фрезы, обрезают концы проволоки и наносят специальное антипригарное покрытие, которое снижает прилипание брызг.

В процессе роботизации сварки остаётся проблема точного и надёжного определения координат сварочного стыка, несмотря на использование современных сенсоров, которые были указаны ранее.

Перспективным сенсором для определения координат сварочного стыка является СТЗ за счёт своей универсальности и бесконтактного действия. Но применение СТЗ для сварки имеет особенности, связанные с сильно изменяющимся освещением, температурным воз-

действием и наличием брызг металла, способных повредить оптическую систему. В данной статье авторы предлагают методику, которая, позволит определять координаты сварочного стыка с требуемой точностью в условиях сильных световых помех.

### 1.2.2. Система управления робототехническим комплексом

Система управления робототехническим комплексом дуговой сварки является адаптивной системой с сигнальной адаптацией и замкнутой цепью самонастройки. Структурная схема адаптивной системы управления роботом KUKA для дуговой сварки приведена на рис. 3.

В системах с сигнальной (пассивной) адаптацией эффект самонастройки достигается с помощью компенсирующих сигналов без изменения параметров управляющего устройства. Адаптивные системы замкнутого типа имеют замкнутый вспомогательный контур настройки параметров. В самонастраивающихся адаптивных системах изменяются только значения параметров регулятора [16].

Адаптивная система управления роботом работает следующим образом: сигнал с камеры СТЗ поступает на устройство вычисления координат сварочного стыка, в котором в результате обработки и анализа изображения определяются текущие координаты сварочного стыка в прямоугольной системе координат, которые, в свою очередь, с помощью решения обратной задачи кинематики преобразуются в обобщенные координаты робота  $Q(q_1, \dots, q_6)$ .

Устройство управления роботом KRC4 сравнивает текущие программные значения обобщенных координат, и, если они отличаются от полученных координат от СТЗ, управление происходит на основе последних. В противном случае управление будет осуществляться по программной траектории без адаптации.

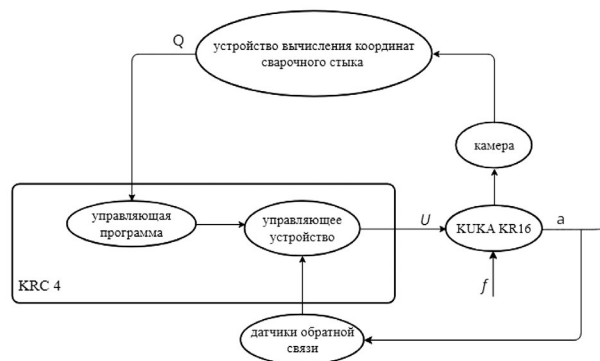


Рис. 3. Структурная схема адаптивной системы управления роботом KUKA для дуговой сварки

## Программная реализация и сравнительный анализ алгоритмов определения координат шва

### 2.1. Выбор инструментов программирования

#### 2.1.1. Язык программирования Python

Для исследования алгоритмов, определяющих методику определения координат сварных стыков, был использован язык программирования высокого уровня Python.

Данный язык был выбран, так как он удобен для решения подобных задач, легко изучается за счёт большого количества обучающих материалов и может работать с библиотекой OpenCV.

Разработка методики определения координат сварочных стыков проводилась под управлением операционной системы Windows, что соответствует требованиям «мягкого» реального времени. В реальных условиях те же самые алгоритмы, составляющие методику определения координат сварочного стыка, можно реализовать под управлением системы «жесткого» реального времени, например, Linux.

#### 2.1.2. Библиотека OpenCV

OpenCV является одной из самых популярных библиотек для использования компьютерного зрения.

OpenCV — библиотека с открытым кодом алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения. Используется C/C++, но также доступны версии для Python, Java, Ruby, Matlab, Lua и других языков. Она разрабатывалась сначала в Intel, а затем в Itseez при активном участии общественности с 1998 года.

Библиотеку можно свободно и бесплатно использовать как в закрытых, так и в открытых проектах, поскольку она распространяется по открытой лицензии.

### Исследование работы алгоритмов определения координат сварного шва

Рассматриваемые в данной работе методы определения координат стыков в системе технического зрения сварочного робота основаны на алгоритмах обработки изображений. Они реализуются как процессы обработки, на вход которых подаётся изображение, а на выходе выдаются координаты сварочного стыка.

Авторами была составлена базовая общая структура алгоритма определения координат сварочного стыка двух деталей (рис. 4).

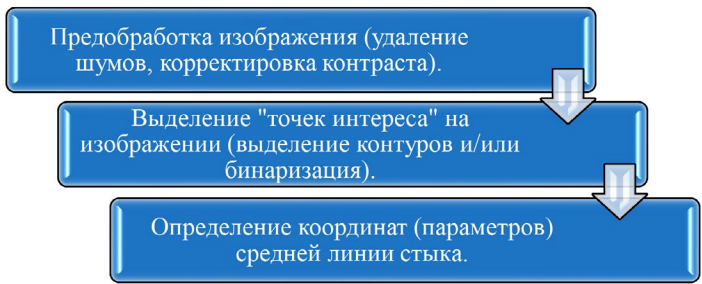


Рис. 4. Общая структура алгоритма определения координат сварочного стыка

Была проведена серия пробных испытаний отдельных инструментов обработки изображений. В результате, для определения координат средней линии стыка было решено использовать преобразование Хафа. Этот инструмент показал очень хорошие результаты, при условии качественного выполнения предыдущих двух этапов обработки (удаления шумов и выделения области интереса) [9].

Таким образом, акценты в определении координат стыка сместились на уровень предобработки изображения и выделения области интереса.

Было проведено исследование, в котором были использованы операторы из библиотеки Open CV в различных комбинациях для получения лучшего результата по определению координат сварочного стыка. Для этого была составлена схема выбора алгоритмов определения координат стыка (рис. 5).

Исходя из принятой условной нумерации блоков инструментов-операторов обработки изображений, каждому алгоритму был присвоен свой уникальный шифр. Этот шифр несёт информацию о последовательности применения тех или иных операторов обработки изображений.

Например, А-0-1-3.3-4.1-6-7 обозначает А-алгоритм обработки исходного растрового изображения в следующем порядке: перевод в полутоновое, фильтрация шумов двусторонним фильтром, бинаризация с адаптивным порогом, преобразование Хафа, построение линии по полученным параметрам и оценка метода по критериям: быстродействие, точность, устойчивость к шумам.

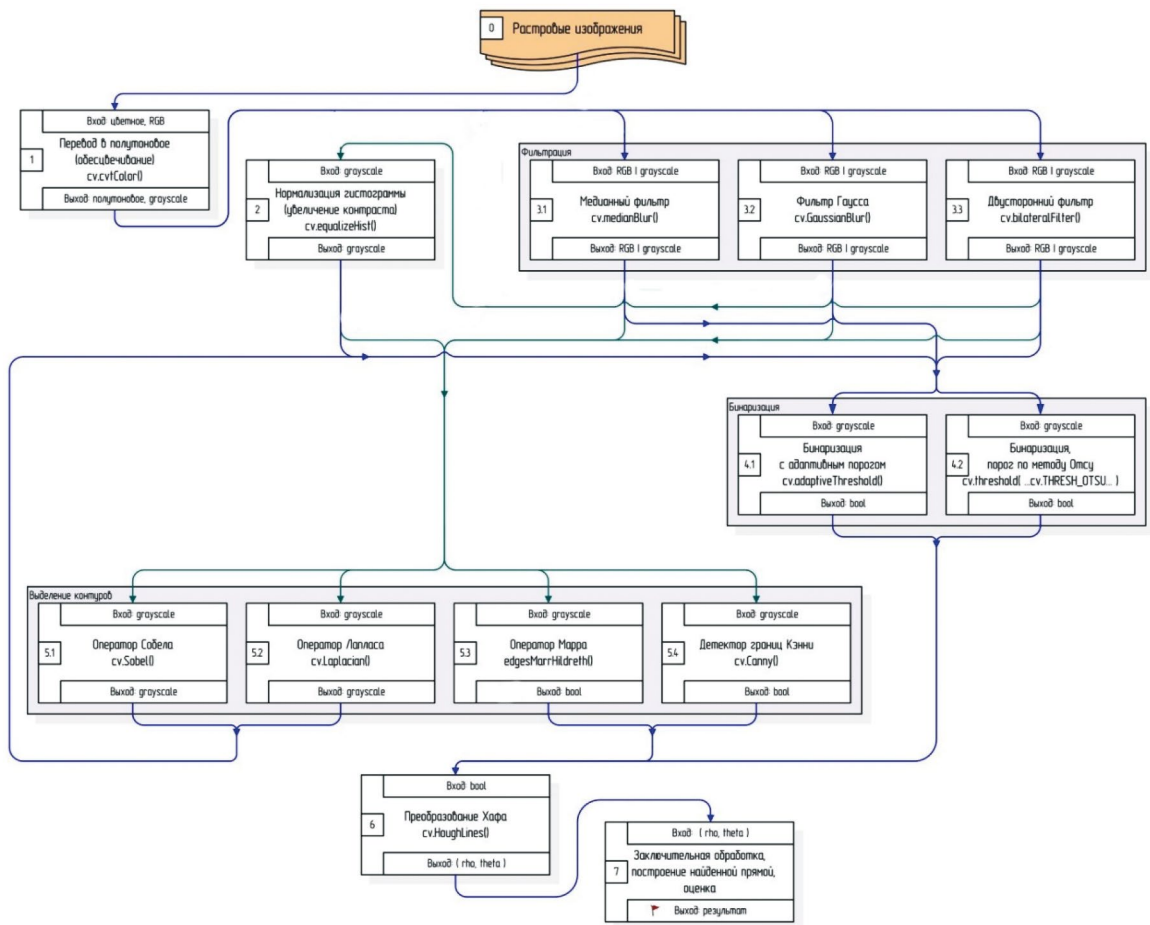


Рис. 5. Схема выбора алгоритмов определения координат стыка



Предложенные варианты алгоритмов определения координат сварочного стыка были протестированы с помощью разработанной программы обработки изображений на заранее подготовленных изображениях, моделирующих вид стыка двух деталей.

#### 4. Результаты работы алгоритмов распознавания стыка деталей на изображении

На рис. 6, 7, 8, 9 показаны результаты работы алгоритмов определения координат сварочных сты-

ков. Слева сверху приведено изображение реального сварочного стыка, справа снизу – линия сварочного стыка (обозначена зеленым цветом), полученная в результате обработки координат точек сварочного стыка преобразованием Хафа. Характеристики этой линии определяются значениями параметров  $\theta$  и  $\rho$ , которые показаны на рис. 10. Значения  $\theta$  и  $\rho$ , полученные в результате обработки изображения сварочного стыка разными алгоритмами, представлены в таблице.

Таблица содержит результаты обработки изображений сварочного стыка различными алгорит-

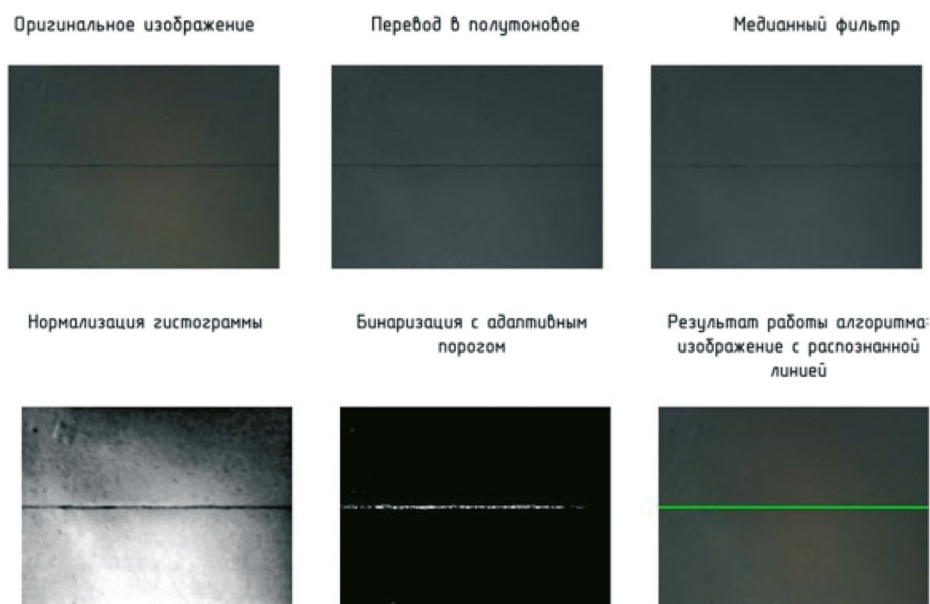


Рис. 6. Результаты работы алгоритма А-3.1-2-4.1

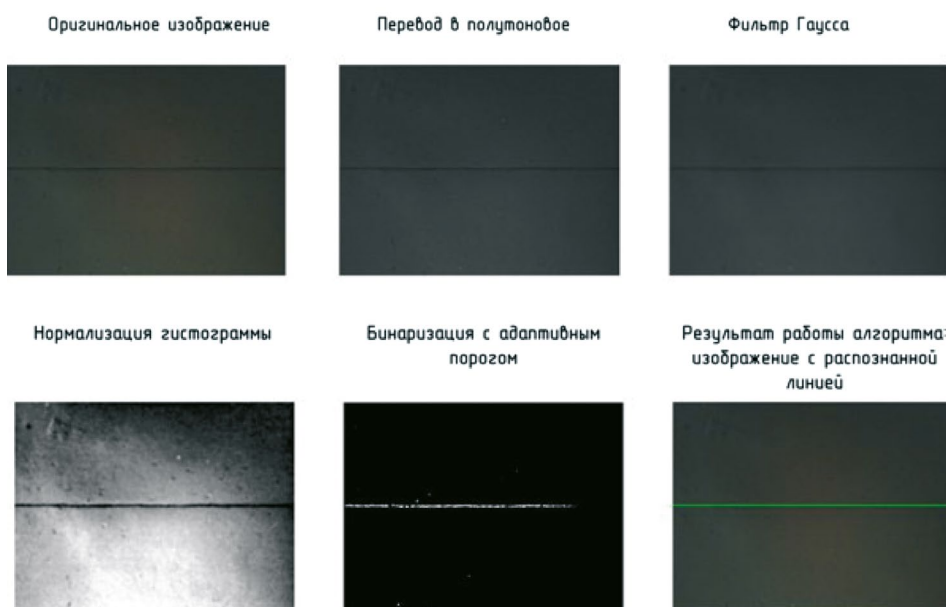


Рис. 7. Результаты работы алгоритма А-3.2-2-4.1

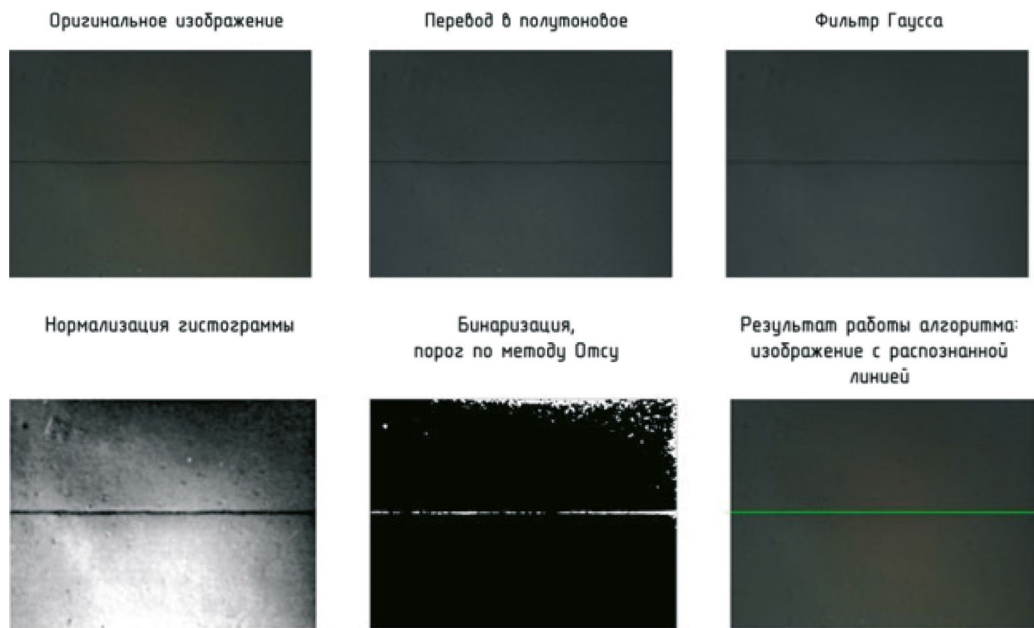


Рис. 8. Результаты работы алгоритма А-3.2-2-4.2

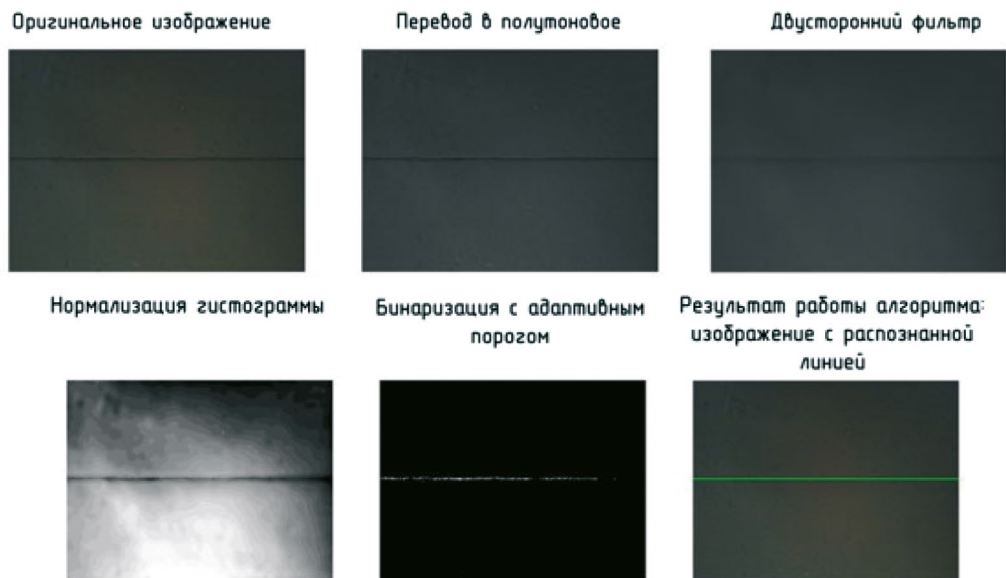


Рис. 9. Результаты работы алгоритма А-3.3-2-4.1

мами. В ней приведены результаты преобразования Хафа  $\theta$  и  $\rho$ , время работы алгоритма и координаты характерных точек А и В, которые задают линию сварочного стыка и передаются в систему управления роботом. Координаты этих точек определяются в соответствии с *рис. 10*.

В *таблице* знаком «+» отмечены алгоритмы, которые могут быть использованы для определения координат сварочных стыков. Пригодность алгоритма определяется его возможностью корректно распознавать сварочный стык и определять координаты его характерных точек.

Алгоритмы, которые отмечены знаком «-», не распознали сварочный стык или неправильно определили характерные точки.

Реальная погрешность определения координат сварочного стыка (точки А, В) зависит от характеристик камеры, объектива, погрешности преобразования координат и способа закрепления камеры (на роботе, над роботом). Разрабатывая методику, авторы не имели возможности провести полноценный эксперимент.

Таблица

## Результаты обработки изображений сварочного стыка различными алгоритмами

Алгоритм, шифр	Пригодность алгоритма	Показатели			Координаты точек линии сварочного стыка (мм)			
		rho, пикселей	theta, рад.	время, с	X <sub>A</sub>	Y <sub>A</sub>	X <sub>B</sub>	Y <sub>B</sub>
A-31-54	+	1,498	0,0028	0,097	1.4788	0.0042	1.494	1.502
A-32-53	+	1,218	0,0028	6,089	1.218	0.0034	1.214	1.222
A-32-54	+	64,253	0,1599	0,065	63.43	10.23	53.20	73.63
A-33-54	-	65,387	0,3098	0,082	62.274	19.93	42.37	82.19
A-31-2-41	+	20,229	0,0261	0,061	20.222	0.528	19.70	20.75
A-31-2-42	-	238,418	0,0098	0,071	238.41	2.336	236.0	240.8
<b>A-32-2-41</b>	<b>+</b>	<b>1,853</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,055</b>	<b>1.853</b>	<b>0.0052</b>	<b>1.85</b>	<b>1.86</b>
A-32-2-42	+	122,053	0,0063	0,046	122.05	0.769	121.2	122.8
A-33-2-41	+	91,853	0,1599	0,182	90.68	14.624	76.05	105.3
A-33-2-42	+	65,053	0,1001	0,070	64.727	6.501	58.22	71.23
A-31-2-54	+	1,598	0,0028	0,073	1.598	0.0045	1.593	1.603
<b>A-32-2-54</b>	<b>+</b>	<b>0,853</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,050</b>	<b>0.853</b>	<b>0.0024</b>	<b>0.85</b>	<b>0.856</b>
A-31-51-42	+	1,450	0,0028	0,067	1.45	0.0041	1.446	1.454
A-32-51-41	+	1,253	0,0028	0,044	1.253	0.0035	1.25	1.257
<b>A-32-51-42</b>	<b>+</b>	<b>1,020</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,080</b>	<b>1.02</b>	<b>0.0029</b>	<b>1.017</b>	<b>1.023</b>
A-32-52-42	+	1,429	0,0028	0,045	1.43	0.004	1.425	1.433
A-33-52-41	-	229,622	0,4776	0,209	203.93	105.55	98.28	309.5
A-33-52-42	-	202,383	0,4704	0,239	180.40	91.729	88.64	272.3
A-31-2-51-41	+	109,214	0,3134	0,141	103.89	33.67	70.22	137.6
<b>A-32-31-2-54</b>	<b>+</b>	<b>0,853</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,068</b>	<b>0.853</b>	<b>0.0024</b>	<b>0.85</b>	<b>0.856</b>

На основе анализа источника [9] авторы предполагают, что использование метода Хафа позволит определить координаты характерных точек с погрешностью меньшей, чем один пиксель.

Выбирая соответствующую оптику камеры, можно изменять размер рабочей зоны наблюдения сварочного стыка. На основе анализа литературных источников [12-14, 16] предлагается использовать рабочую зону 30x30 мм и разрешение камеры 1024x1024. В этом случае получается следующая погрешность измерения: 30мм/1024=0,029 мм.

Это соответствует допустимой погрешности, которая была указана вначале – 0,03...0,05 мм. Погрешность при необходимости можно уменьшить за счёт уменьшения поля зрения или увеличения разрешения камеры.

На рис. 10 показано определение координат точек А, В по параметрам преобразования Хафа  $\theta$

и  $\rho$ . Формулы (1) выражают эту зависимость аналитически.

$$\begin{aligned}
 x_A &= \rho \cos \theta \\
 y_A &= \rho \sin \theta \\
 x_A = C + x_B &\Rightarrow x_B = x_A - C \\
 C = \rho \sin \theta &\Rightarrow x_B = \rho(\cos \theta - \sin \theta) \\
 y_B = D + y_A &= \rho \cos \theta + \rho \sin \theta = \rho(\sin \theta + \cos \theta)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Исходя из полученных данных, лучшие результаты, на заданной выборке из пяти изображений показали следующие алгоритмы распознавания и определения координат стыка:

- **A-32-2-54:** перевод в полутоновое изображение при 256 градациях серого, фильтрация шумов фильтром Гаусса, нормализация гистограммы, детектор границ Кэнни, преобразова-



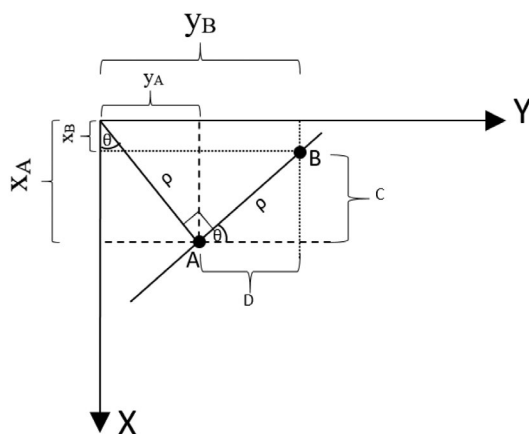


Рис. 10. Определение характерных координат точек сварочного стыка на основе преобразования Хафа

ние Хафа, построение линии по полученным параметрам и оценка метода.

- **А-32-51-42:** перевод в полутоновое изображение при 256 градациях серого, фильтрация шумов фильтром Гаусса, оператор Собела, бинаризация с порогом по методу Отсу, преобразование Хафа, построение линии по полученным параметрам и оценка метода.
- **А-32-31-2-54:** перевод изображения в изображение при 256 градациях серого, фильтрация шумов фильтром Гаусса (17×17), фильтрация медианным фильтром (11×11), нормализация гистограммы, детектор границ Кэнни (пороги 48 и 160, ядро 3), преобразование Хафа (порог аккумулятора 184), на выходе два значения параметров  $(\rho_1, \theta_1)$  и  $(\rho_2, \theta_2)$ , определяющих две параллельные линии, ограничивающие контуры распознанного стыка деталей. Из них вычисляем параметры средней линии стыка:  $\left( \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}, \theta \right)$ .

### Заключение

В работе решена задача по разработке методики определения координат сварочного стыка в СТЗ промышленного робота на основе преобразования Хафа. В результате, разработанная методика содержит алгоритмы, которые позволяют за минимальное время (50 мс) распознать сварочный стык и определить его координаты по двум характерным точкам. Надежность распознавания подтверждается корректным распознаванием сварочных стыков и определением его координат в серии из 15 опытов с разными изображениями сварочных стыков на основе алгоритма А-32-2-54.

В результате выполненной работы было разработано программно-алгоритмическое обеспечение на языке Python с использованием библиотеки Open CV. Разработанное программное обеспечение может быть использовано в сварочных роботах с СТЗ.

### Библиографический список

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение / Учебное пособие для студентов вузов – М.: Машиностроение, 2006.
2. Поливанов А.Ю., Иванов Ю.В., Холин Д.В. Калибровка видеосенсора системы технического зрения промышленного робота для лазерной сварки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2019. – № 2 (49). – С. 119–126. – EDN: XCLZLH.
3. Поливанов А.Ю., Иванов Ю.В., Холин Д.В. Методика преобразования координат системы технического зрения промышленного робота для операции лазерной сварки // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020/ – № 21(3). – С. 166–173.
4. Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами: учебн. для ВУЗов. 2-е изд. исправ. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
5. K.S. Fu., R.C. Gonzalez, C.S.G. Lee. Robotics: control, sensing, vision and intelligence. – McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
6. Mahidzal Dahari, Jian-Ding Tan. Forward and inverse kinematics model for robotic welding process using KUKA KR16 robot, 2011.
7. Яне Б. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
8. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
9. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р., М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
10. Калибровка камеры с использованием OpenCV [Электронный ресурс] // URL: <https://waksoft.susu.ru/2020/02/29/kalibrovka-kamery-s-ispolzovaniem-opencv.html> (дата обращения 11.12.23).
11. Анализ методов калибровки стереоскопических камер [Электронный ресурс] // URL: <https://studopedia.org/13-37634.html> (дата обращения 12.12.23).
12. Виды роботизированной сварки [Электронный ресурс] // URL: <https://robomatic.ru/content/vidy-robotizirovannoy-svarki.html> (дата обращения 12.12.23).
13. Сварочные швы // URL: <https://proflasermet.ru/article/svarochnye-shvy.html> (дата обращения 06.10.23).

14. Особенности применения роботизированных комплексов в сварке // URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/osobennosti-primeneniya-robotizirovannykh-kompleksov-v-svarke.html> (дата обращения 07.12.23).

15. Калибровка шестизвенных манипуляторов универсальных промышленных роботов // URL: <http://forum.russ2.com/lofiversion/index.php/t1133.html> (дата обращения 12.11.23).

16. Сварочная система Kemppi A7 MIG Welder 450 // URL: <https://www.kemppi.com/ru/offering/family/a7-mig-welder/> (дата обращения 29.10.23).

## References

1. Poduraev Y.V. Mechatronics: fundamentals, methods, application. Textbook for university students – M.: Mechanical engineering, 2006.

2. Polivanov A.Yu., Ivanov Yu.V., Kholin D.V. Calibration of the video sensor of the technical vision system of an industrial robot for laser welding. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2019. No. 2 (49). P. 119–126. EDN: XCLZLH.

3. Polivanov A.Yu., Ivanov Yu.V., Kholin D.V. Method for converting coordinates of the computer vision system of an industrial robot for laser welding operations. *Mechatronics, automation, control*. 2020. Vol. 21(3). P. 166–173.

4. Zenkevich S.L. Fundamentals of control of manipulation robots: Textbook for universities. 2nd ed. corrected and additional M.: Publishing MSTU im. N.E. Bauman, 2004, P. 480.

5. K.S. Fu., R.C. Gonzalez, C.S.G. Lee. Robotics: control, sensing, vision and intelligence. McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.

6. Mahidzal Dahari, Jian-Ding Tan. Forward and inverse kinematics model for robotic welding process using KUKA KR16 robot, 2011.

7. Yane B. Digital image processing. M.: Technosphere, 2007, P. 584.

8. Yurevich E.I. Basics of robotics. 2nd ed. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005, P. 416.

9. Gonzalez R. Digital image processing / Gonzalez R., Woods R. M.: Technosphere, 2012. P. 1104.

10. Calibrating camera using OpenCV [Electronic resource] // URL: <https://waksoft.susu.ru/2020/02/29/kalibrovka-kamery-s-ispolzovaniem-s-opencv.html> (visiting date 11.12.23).

11. Analysis of stereoscopic camera calibration methods [Electronic resource] // URL: <https://studopedia.org/13-37634.html> (visiting date 12.12.23).

12. Types of robotic welding [Electronic resource] // URL: <https://robomatic.ru/content/vidy-robotizirovannoy-svarki.html> (visiting date 12.12.23).

13. Welding seams // URL: <https://proflasermet.ru/article/svarochnye-shvy.html> (visiting date 06.10.23).

14. Features of the use of robotic complexes in welding // URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/osobennosti-primeneniya-robotizirovannykh-kompleksov-v-svarke.html> (visiting date 07.12.23).

15. Calibrations of six-point manipulators of universal industrial robots // URL: <http://forum.russ2.com/lofiversion/index.php/t1133.html> (visiting date 12.11.23).

16. Kemppi A7 MIG Welder 450 welding system // URL: <https://www.kemppi.com/ru/offering/family/a7-mig-welder.html> (visiting date 29.10.23).

## Информация об авторах

**Поливанов Александр Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
shpoliv@mail.ru

**Дабул Юсеф** – аспирант кафедры робототехники и мехатроники, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
youssefdaboal@hotmail.com

## Information about the authors

**Polivanov Alexander Yurievich** – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Robotics and Mechatronics”, MSUT “STANKIN”  
shpoliv@mail.ru

**Daboul Yousef** – postgraduate student at the sub-department of “Robotics and Mechatronics”, MSUT “STANKIN”  
youssefdaboal@hotmail.com

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.