

V. I. Busurin, Professor, vibusurin@mega.ru, Liu Zhe, Postgraduate
P. S. Akhlamov, Engineer, pakhlamov@hotmail.com,
N. A. Berdjugin, Engineer, ber.nikolaj2012@yandex.ru,
Moscow Aviation Institute (National Research University)

Research of Gap Mechatronic Stabilization System of Scanning Profilometer of Optical Non contact Approximation Transducer

The article describes the structure of the mechatronic system stabilization gap and mathematical model of non-contact optical approximation transducer based on optical tunneling effect.

Today so-called scanning atomic force microscopes (AFM) are widely used. The main disadvantage of AFM is very small working gap (about 10 nm to several picometers), that could cause damage to the object of measurement, breakage of the scanning head (needle), but also to inaccuracies in the model. Foreign and domestic scientists and researchers have proposed different approaches to solve this problem. In this paper we considered the option of constructing a model with a scanning profilometer with a larger gap.

Reflectivity of the transducer depending upon various design factors such as initial gap, radius of the sphere, size of the sphere is calculated and described. It is shown, that the dependence increase the radius of the sphere and the refractive index of the material of it, in case of reducing the size of a segment of the sphere and numerical apertures, leads to reduction of integral output power. Estimation of intermolecular interaction forces occurred with inverter operation approximation showed that their influence effect can be neglected. The proposed approximation transducer can be effectively used for other measurement of mechanical values, driven to nanoparameters, such as accelerations, speeds, forces etc.

Keywords: transducer, profilometer, mechatronic system, optical tunneling, conversion function

References

1. Gross L., Mohn F., Moll N., Liljeroth P., Meyer G. The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy. *Science*. 2009. N. 325 (5944). P. 1110—1114.

2. Busurin V. I., Knjaz V. A., Hodin M. M., Skripnik N. P. Skanirujushhij profilometr dlja izmerenija profilja cilindricheskih tel. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*. 2010. N. 2 (107). P. 36—42.
3. Born M., Volf E. *Osnovy optiki*. 2-e izd. M.: Nauka, 1972.

УДК 621.791; 519.6

А. И. Абрамов, канд. техн. наук, зав кафедрой, x1015@mail.ru,

Т. А. Мазитов, магистрант, gymit1991@yandex.ru,

Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова

Сравнительный анализ эффективности методов поиска стыка деталей при автоматической сварке

Проведен сравнительный анализ эффективности методов поиска стыка деталей при автоматической сварке двух типов: труба — пластина и пластина — пластина. Предложено четыре метода: корреляционный метод; использование нейросетей; аппроксимация прямыми; аппроксимация прямыми и окружностями после сегментации. Отмечаются достоинства и недостатки каждого метода, условия их адекватной работы.

Ключевые слова: MIG/MAG сварка, система слежения, триангуляция, метод наименьших квадратов, аппроксимация, нейроны, RANSAC

Введение

Для автоматического управления положением сварочной горелки (электрода) относительно свариваемого изделия или наплавляемой поверхности предложено большое число разнообразных следящих систем, однако в промышленности они применяются недостаточно широко. Это объясняется главным образом отсутствием или малой надежностью датчиков, пригодных для условий сварочного производства. Автоматизация сварочных операций с помощью следящих систем связана с разработкой способов и средств измерения фактического положения стыка или наплавляемой поверхности для

каждого экземпляра изделия. Выбор метода и состава технических средств автоматизации перемещения сварочного инструмента по линии шва зависит, прежде всего, от характера и объема информации, которая должна обрабатываться при управлении. В последнее время большое распространение получили оптические системы слежения триангуляционного типа [1, 2]. Они характеризуются высокой точностью, информативностью и надежностью.

Для решения задач технологической и геометрической адаптации не существует универсальной модели, подходящей для всех видов свариваемых стыков. Для автоматизации процесса сварки в ка-

ждом конкретном случае используются наиболее подходящие модели. В данной статье рассмотрены возможные алгоритмы для нахождения стыка свариваемых деталей.

Описание тестовой системы слежения

Основными элементами системы слежения триангуляционного типа являются видеокамера, линзы и линейная лазерная подсветка. Излучение лазера рассеивается на разделку кромок, отраженное излучение собирается объективом камеры и преобразовывается в цифровую информацию для дальнейшей обработки. Схема системы слежения триангуляционного типа представлена на рис. 1.

Тестирование работы алгоритмов проводилось на универсальном промышленном роботе KUKA 663, имеющем шесть степеней подвижности. На рабочем органе манипулятора была установлена система сле-

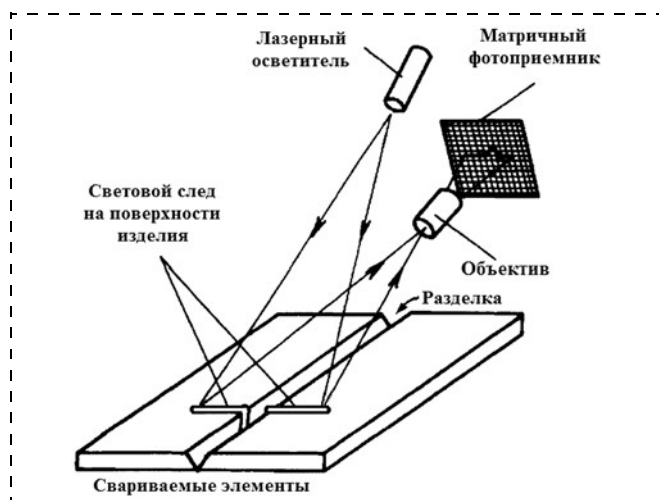


Рис. 1. Схема системы слежения триангуляционного типа

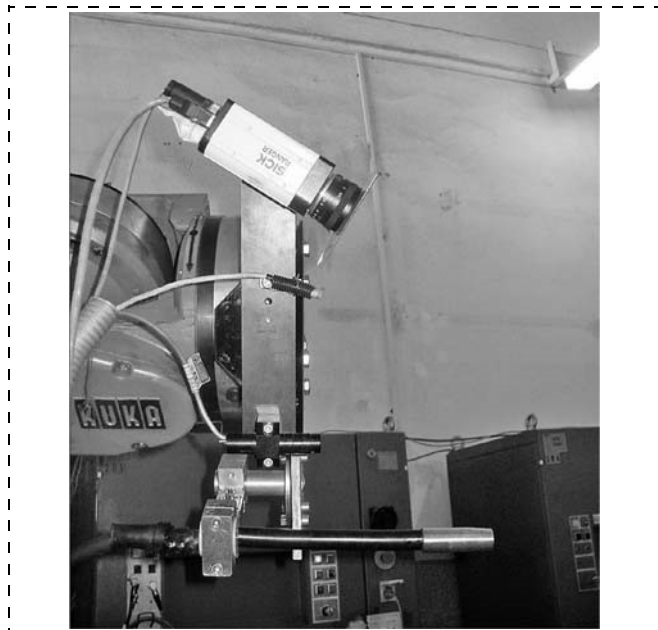


Рис. 2. Система слежения SICK RANGER 40D

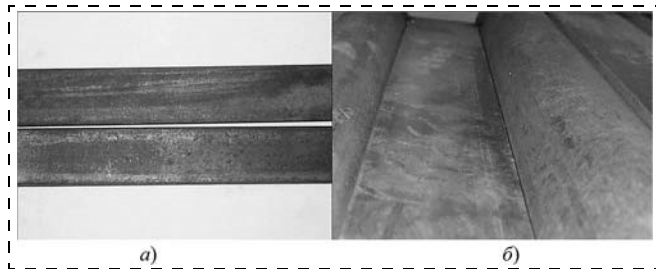


Рис. 3. Тестовые образцы

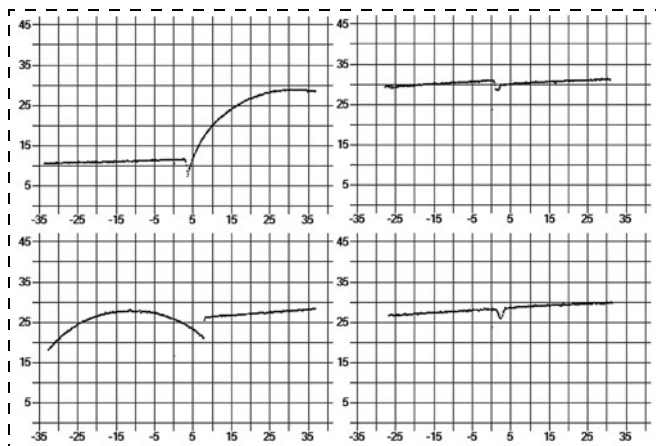


Рис. 4. Профили стыков, полученные системой слежения SICK RANGER 40D

жения триангуляционного типа SICK RANGER 40D. Камера позволяет получать до 1000 профилей в секунду, состоящих из 512 точек независимо от контрастности и цветности изображения. 3D-камера Ranger 40D легко интегрируется через интерфейс Gigabit Ethernet, отличается простотой калибровки, настройкой и программирования. На рис. 2 изображено выходное звено манипулятора с закрепленной на нем системой технического зрения и сварочной горелкой.

Алгоритмы тестировали на двух видах стыка: 1) две металлические полосы толщиной 4 мм, соединенные встык (рис. 3, а); 2) стык, образованный соединением трубы и полосы (рис. 3, б).

На рис. 4 представлены профили стыков, полученные системой слежения SICK RANGER 40D. Каждый профиль состоит из 512 точек.

Исследуемые методы

Корреляционный метод. Корреляционный анализ — метод, позволяющий обнаружить зависимость между несколькими величинами. Коэффициент корреляции Пирсона позволяет установить тесноту связи двух переменных.

В общем виде формула для подсчета коэффициента корреляции r_{xy} [3] имеет вид

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot \sum (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i — значения, принимаемые переменной X ; y_i — значения, принимаемые переменной Y ; $\tilde{x}$ — средняя по X ; $\tilde{y}$ — средняя по Y .

Поскольку полученный профиль состоит из точек, коэффициент Пирсона возможно использовать для выделения кромок деталей. Для этого необходимо задать эталон — массив точек, определяющих кромку детали. Далее оконным преобразованием вычислить коэффициенты корреляции для всего исследуемого профиля. Максимальное значение коэффициента укажет на наиболее схожий с эталоном участок. Аналогично нужно поступить и для второй кромки. Далее, исходя из положения кромок, вычислить положение сварочной горелки.

Нейросетевой метод. Нейросеть — это обучаемая система. Она действует не только в соответствии с заданным алгоритмом и формулами, но и на основании прошлого опыта. Существует множество различных нейросетей, различающихся по типу организации слоев нейронов, видам и числу связей, алгоритмам обучения. Простейшим примером, применительно к исследуемой задаче — поиску стыка деталей, может служить однослойный персептрон, разработанный Розенблаттом в 1959 г. Персептрон состоит из трех типов элементов, а именно: поступающие от сенсоров сигналы с соответствующими весами передаются ассоциативным элементам (представляющим сумматор), а затем реагирующим элементам (активационная функция) [4].

Алгоритм обучения однослойного персептрона:

1. Инициализация синаптических весов и порога (смещения): значения синаптических весов $w_j(0)$ ($0 \leq i \leq N-1$) и порог (смещение) нейрона b устанавливаются равными некоторым малым случайным числам. Обозначение: $w_j(t)$ — вес связи от j -го входа к нейрону в момент времени t .

2. Предъявление персептрону образа обучающей последовательности $(x(t), y(t))$, где $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t))'$ — вектор значений признаков образа, предъявляемого персептрону на t -м шаге процесса обучения, $y(t)$ — решение учителя о принадлежности этого образа: $y(t) = 1$ для образов первого класса и $y(t) = -1$ — для образов второго класса.

3. Вычисление выхода нейрона:

$$y^*(t) = S\left(\sum_{i=0}^N w_i(t)x_i(t) - b\right).$$

4. Адаптация (настройка) значений весов:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta[y(t) - y^*(t)]x_i(t), \quad 1 \leq i \leq N,$$

где $y^*(t) = \begin{cases} +1, & \text{если } x(t) \in A; \\ -1, & \text{если } x(t) \in B, \end{cases}$ а η — коэффициент коррекции.

Если персептрон принимает решение, совпадающее с решением учителя, то весовые коэффициенты не модифицируются.

Как и в случае с корреляционным анализом, анализ профиля проводится в окне, скользящем по массиву точек исследуемого профиля. Точки, попав-

шие в окно, подаются на входы нейросети, которая делает вывод о степени соответствия исследуемого образа и эталона.

Метод аппроксимации прямыми. Для аппроксимации точек прямыми существует несколько способов. Наиболее распространенными методами являются преобразование Хафа и аппроксимация методом наименьших квадратов [1, 5]. Преобразование Хафа — медленный метод, так как необходим перебор всех прямых на изображении, а для аппроксимации методом наименьших квадратов необходимо выделять точки, принадлежащие одной прямой. Для определения прямой можно использовать число точек, принадлежащих линии, и их расстояние до аппроксимированной прямой. Таким образом, задача аппроксимации заключается в нахождении коэффициентов линейной зависимости, при которых функция двух переменных a и b принимает наименьшее значение. Решение примера сводится к нахождению экстремума функции двух переменных. Составляется и решается система из двух уравнений с двумя неизвестными. Находим частные

производные функции $F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$ по

переменным a и b , приравниваем эти производные к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(a, b)}{\partial a} = 0; \\ \frac{\partial F(a, b)}{\partial b} = 0; \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))x_i = 0; \\ -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b)) = 0; \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n 1 = \sum_{i=1}^n y_i; \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i; \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}; \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n}, \end{cases}$$

где y_i, x_i — координаты точек аппроксимируемой кривой; n — число точек; a, b — коэффициенты уравнения полученной прямой.

Для определения стыка вычисляется расстояние между прямыми и угол между ними. Полученные значения сравниваются между собой и с определенными коэффициентами. Изменяя эти коэффициенты, можно настроить алгоритм для различных типов соединений. Положение сварочной горелки

определяется из положения прямых, определяющих стык.

Метод аппроксимации прямыми и окружностями.

Для поиска стыка геометрически сложных деталей необходимо аппроксимировать профиль не только прямыми, но и окружностями. Для этого необходимо предварительно выполнить сегментацию профиля — определить, какие участки принадлежат прямым, а какие — окружностям. Данную процедуру позволяет провести алгоритм RANSAC. Метод был предложен в 1981 г. Фишлером и Боллесом. Он представляет собой метод оценки параметров модели на основе случайных выборок [6]. Схема RANSAC устойчива к зашумленности исходных данных.

Описание алгоритма

Параметры алгоритма:

- 1) набор исходных данных X ;
- 2) функция M , позволяющая вычислить параметры q модели p по набору данных из n точек;
- 3) функция оценки соответствия точек полученной модели;
- 4) порог t для функции оценки;
- 5) число итераций метода k .

Весь алгоритм состоит из одного цикла, каждую итерацию которого можно логически разделить на два этапа.

- *Первый этап* — выбор точек и подсчет модели.
- Из множества исходных точек X случайным образом выбираются n различных точек.
- На основе выбранных точек вычисляются параметры θ модели P с помощью функции M , построенную модель принято называть гипотезой.
- *Второй этап* — проверка гипотезы.
- Для каждой точки проверяется ее соответствие данной гипотезе с помощью функции оценки E и порога t .
- Каждая точка помечается инлаером или выбросом.
- После проверки всех точек проверяется, является ли гипотеза лучшей на данный момент, и если является, то она замещает предыдущую лучшую гипотезу.

В конце работы цикла оставляется последняя лучшая гипотеза.

Результатом работы метода являются:

1. Параметры q модели p .
2. Точки исходных данных, помеченные инлаерами или выбросами.

Преимуществом алгоритма RANSAC является его способность дать надежную оценку параметров модели, т. е. возможность оценить параметры модели с высокой точностью, даже если в исходном наборе данных присутствует значительное число выбросов.

Применительно к исследуемой задаче сегментации моделями для поиска по алгоритму RANSAC являются уравнения прямой и окружности:

$$y = kx + b;$$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2.$$

Параметры моделей M : для прямой — угловой коэффициент k , коэффициент b ; для окружности — координаты центра x_0 , y_0 и радиус окружности R . Функциями оценки соответствия являются суммы квадратов отклонений точек до прямой и окружности.

Оценка эффективности применения методов поиска стыка деталей

1. Корреляционный метод

В качестве эталонов были выбраны массивы из двадцати точек, описывающие кромки деталей. Результаты работы метода представлены на рис. 5.

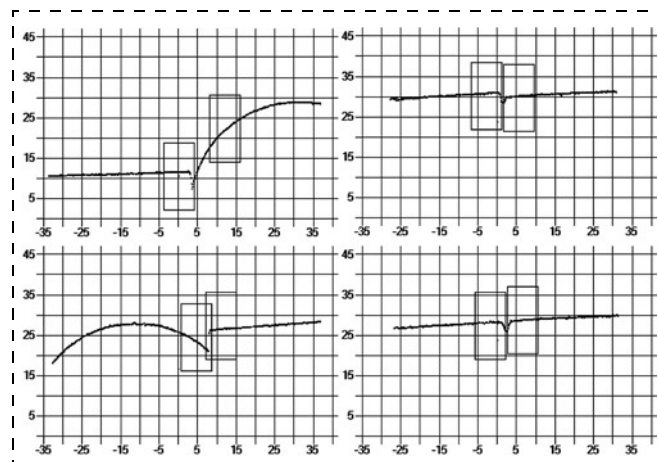


Рис. 5. Результаты работы корреляционного метода

На графиках прямоугольниками выделены точки, определенные корреляционным методом, — наборы точек, наиболее похожие на заданные эталоны.

Метод позволяет быстро выделить кромки деталей. Возможна обработка более 1000 профилей в секунду. Главным недостатком алгоритма является его чувствительность к повороту детали: при смещении детали вдоль осей коэффициент корреляции незначительно колеблется, а при повороте детали резко уменьшается. Также данную модель сложно использовать при наличии прихватки в зоне стыка. Алгоритм можно использовать, когда кромки деталей качественно выполнены, и присутствуют смещения только вдоль осей.

2. Нейросетевой метод

Результаты работы метода представлены на рис. 6.

На графиках прямоугольниками выделены области профилей со стыками, найденными нейросетью. Для обучения использовались стыки, описанные 50 точками.

Полученная модель очень похожа на корреляционный анализ, но менее чувствительна к выбросам. Возможна обработка около 1000 профилей в секунду. К недостаткам данной модели относится сложность

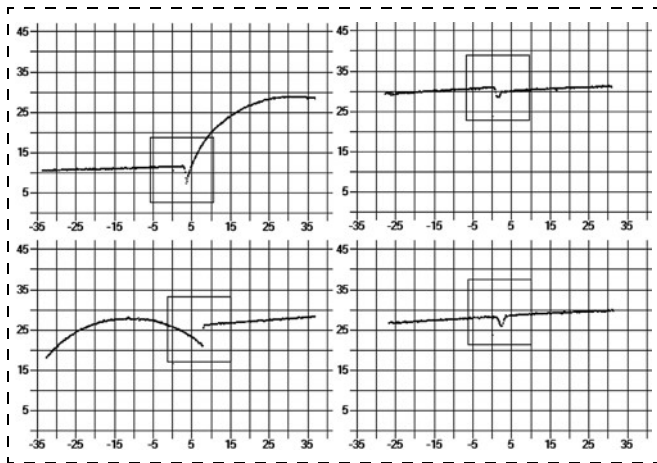


Рис. 6. Результаты работы нейросетевого метода

в правильном обучении, однако нейросети обладают большим потенциалом в задачах распознавания, обусловленным их сложностью и разнообразием.

3. Метод аппроксимации прямыми

Результаты работы метода представлены на рис. 7.

На графиках показаны прямые, полученные с помощью аппроксимирующего метода, ориентация и положение сварочного инструмента вычисляются на основе данных о полученных прямых.

Достоинствами данного метода являются относительно высокая скорость работы и простота. Возможна обработка около 200 профилей в секунду. Алгоритм менее чувствителен к выбросам, стабильнее работает при наличии прихваток.

4. Метод аппроксимации прямыми и окружностями

Результаты сегментации профиля с помощью алгоритма RANSAC представлены на рис. 8.

На рис. 8 графики 1 показывают степень принадлежности точек профиля к окружностям, а 2 — степень принадлежности точек к прямым. Представленные графики были получены за 10 000 итераций алгоритма RANSAC. Рис. 8 иллюстрирует тот факт, что полученные данные позволяют достаточно точно провести сегментацию профиля.

После сегментации была выполнена аппроксимация выделенных областей с помощью метода наименьших квадратов прямыми и окружностями соответственно.

Результаты работы метода представлены на рис. 9.

На графиках показаны прямые и окружности, полученные аппроксимацией соответствующих сегментов, найденных алгоритмом RANSAC.

Аппроксимация окружностями и линиями дает наилучшую точность — метод нечувствителен к выбросам и прихватам. Главным его недостатком является скорость работы: при 10 000 итераций RANSAC-алгоритма скорость обработки составила около 30 профилей в секунду.

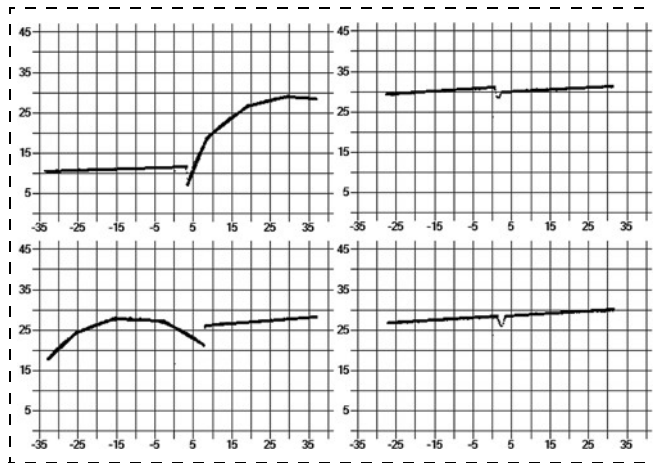


Рис. 7. Результаты работы метода аппроксимации прямыми

Вылет проволоки из сварочной горелки позволяет компенсировать малые отклонения по оси ординат, следовательно, адекватность метода определения положения горелки показывает погрешность измерения по оси абсцисс (рис. 10).

На оси абсцисс цифрами обозначены приведенные ранее методы. По оси ординат в миллиметрах показано среднее квадратическое отклонение измерения положений горелки, рассчитанное по 20 измерениям профиля В.

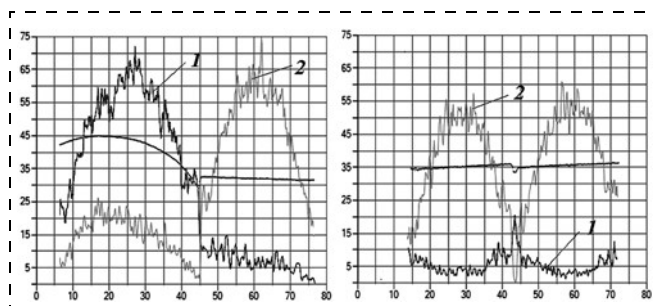


Рис. 8. Данные, полученные с помощью алгоритма RANSAC

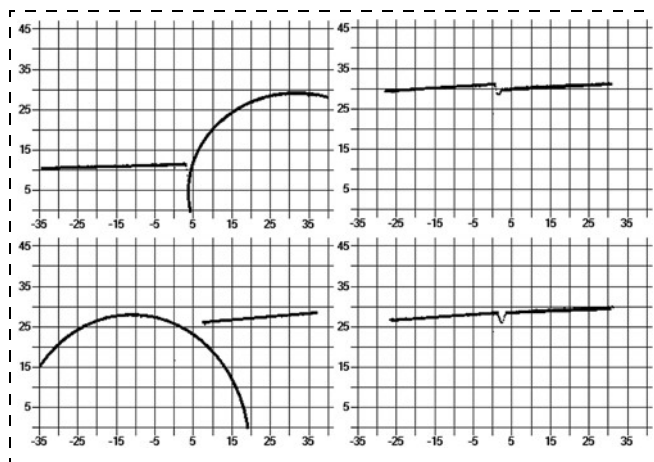


Рис. 9. Результаты работы метода аппроксимации прямыми и окружностями

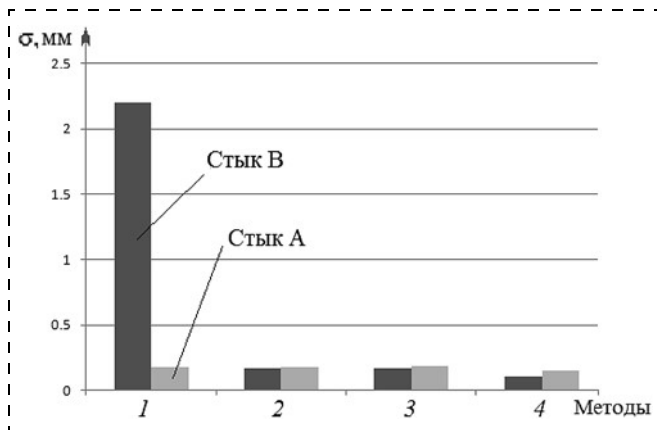


Рис. 10. Среднеквадратическое отклонение измерения положений горелки

График показывает, что все методы, кроме корреляционного анализа, при правильной настройке и приемлемых условиях могут быть применены для поиска положения сварочной горелки для рассмотренных типов соединений.

Заключение

В данной работе представлены возможные модели для поиска стыка свариваемых деталей. Предложено четыре алгоритма: корреляционный метод — самый быстрый способ, позволяет выделить кромки

деталей, чувствителен к поворотам деталей; использование нейросетей — при правильном обучении позволяет выделить стык деталей, сравним по скорости с корреляционным методом; аппроксимация прямыми — сравнительно быстрый метод, позволяющий найти стык деталей при наличии выбросов и других незначительных искажений; аппроксимация прямыми и окружностями — самый медленный, но нечувствительный к крупным и мелким искажениям и выбросам алгоритм. Рассмотренные алгоритмы имеют свои достоинства и недостатки, это говорит о том, что для каждой задачи необходимо использовать оптимальный метод.

Список литературы

1. Бабкин К. Д., Певзнер Я. Б., Осипов В. В., Кузнецов А. В. Триангуляционный датчик наведения для слежения за свариваемым стыком при гибридной лазерно-дуговой сварке сталей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 4.
2. Демкин В. Н., Степанов В. А., Шадрин М. В. Системы быстрого прототипирования с лазерным сканированием // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3.
3. Bruck H. A., McNeill S. R., Sutton M. A., Peters W. H. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction // Experimental Mechanics. 1989. N. 29. P. 261—267.
4. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. М.: Вильямс, 2006. 1103 с.
5. Дудкин А. А., Вершок Д. А. Аппроксимация прямыми линиями контуров объектов на полутоновых изображениях // Известия южного федерального университета. Технические науки. 2004. № 9.
6. Nister D. Preemptive RANSAC for live structure and motion estimation // ICCVProc. 2003. P. 199—206.

A. I. Abramov, Chief of department, x1015@mail.ru, T. A. Mazitov, Master student, rymit1991@yandex.ru, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Comparative Analysis of the Effectiveness of the Methods to Search the Joint Parts in Automatic Welding

This paper considers mathematical methods for finding welding point for two type of joint: pipe — plate and plate — plate. Four algorithms are offered: the correlation method — the fastest way, allows to allocate edges of details, but it is sensitive to rotations of the parts; the use of neural networks — with the right training, allows you to select the joint parts, comparable in speed to the correlation method; approximation by straight lines — fast method, allowing to find a joint of details in the presence of emissions and other insignificant distortions; approximation by straight lines and circles — the slowest algorithm, but it is insensitive to large and small distortions and emissions. The algorithms have their advantages and disadvantages, it is said that for each task, you must use the optimal method.

Keywords: MIG/MAG welding, the vision system, triangulation, the method of least squares, approximation, networks, RANSAC

References

1. Babkin K. D., Pevzner Ya. B., Osipov V. V., Kuznetsov A. V. Triangulyatsionnyy datchik navedeniya dlya slezheniya za svarivayemym stykom pri gibridnoy lazerno-dugovoy svarke staley. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013. N. 4.
2. Demkin V. N., Stepanov V. A., Shadrin M. V. Sistemy bystrogo prototipirovaniya s lazernym skanirovaniem. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013. N. 3.

3. Bruck H. A., McNeill S. R., Sutton M. A., Peters W. H. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Experimental Mechanics*. 1989. N. 29. P. 261—267.
4. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. М.: Вильямс, 2006. 1103 с.
5. Дудкин А. А., Вершок Д. А. Аппроксимация прямыми линиями контуров объектов на полутоновых изображениях. *Izvestiya yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2004. N. 9.
6. Nister D. Preemptive RANSAC for live structure and motion estimation. *ICCV Proc*. 2003. P. 199—206.