



УДК 621.9.048

*К.Д. Бабкин, Я.Б. Певзнер,
В.В. Осипов, А.В. Кузнецов*

ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЙ ДАТЧИК НАВЕДЕНИЯ ДЛЯ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СВАРИВАЕМЫМ СТЫКОМ ПРИ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ

*K.D. Babkin, Ya.B. Pevzner,
V.V. Osipov, A.V. Kuznetsov*

TRIANGULATION SENSOR FOR WELD TRACKING DURING HYBRID LASER-ARC WELDING OF STEELS

Описаны требования, предъявляемые к системам отслеживания свариваемых стыков при гибридной лазерно-дуговой сварке металлов. Требуемые высокие точности наведения и узкие разделки ограничивают применимость традиционных контактных датчиков. В качестве альтернативы был выбран метод лазерной триангуляции, описаны основы алгоритмов обработки изображения. Для использования в составе лазерно-дугового сварочного комплекса разработан датчик наведения, который отвечает всем необходимым требованиям по точности и робастности.

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА. НАВЕДЕНИЕ НА СТЫК. ЛАЗЕРНЫЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЙ ДАТЧИК. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ.

The requirements for weld tracking systems during laser-arc welding of steels are described. Because of high required accuracies and narrow welding cuttings usage of traditional contact sensors are limited. Laser triangulation method was chosen instead and image processing algorithms are described. Tracking sensor, based on these algorithms was made for using during hybrid laser-arc welding. This sensor meets all necessary requirements in terms of accuracy and robustness.

LASER-ARC WELDING. WELD TRACKING. LASER TRIANGULATION SENSOR. MACHINE VISION. IMAGE RECOGNITION.

Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов — динамично развивающаяся технология. Она находит широкое применение при изготовлении конструкций судостроения, тяжелого машиностроения, используется при сварке труб больших диаметров, толстостенных баков, цистерн, обечаек. Толщина свариваемых листов составляет от 5 до 50 мм при длине сварного соединения до 10–20 метров. Эта технология хорошо себя зарекомендовала как замена традиционной многопроходной сварки плавящимся электродом на стыковых и тавровых швах. Гибридная лазерно-дуговая сварка позволяет улучшить металлургические характеристики сварно-

го соединения, уменьшить зону термического влияния и увеличить скорость сварки. Однако она более требовательна к качеству подготовки свариваемого стыка и, как следствие, к системам слежения и наведения технологического инструмента. Отклонение лазерного луча от стыка во время сварки должно быть не более диаметра фокального пятна и составлять 0,2–0,4 мм. Для обеспечения такой точности наведения необходимо включить в состав технологического комплекса систему наведения, которая с погрешностью не хуже $\pm 0,1$ мм будет определять положение стыка и формировать управляющий сигнал для манипулятора.

Постановка задачи

При создании технологического комплекса для лазерно-дуговой сварки труб больших диаметров была поставлена задача: разработать систему наведения на стык для сварочного трактора. Основные требования, предъявляемые к системе:

точность определения положения стыка — не хуже $\pm 0,1$ мм;

тип свариваемых швов — стыковые, с разделкой и без нее;

высокая надежность распознавания узких ($10-30^\circ$) разделок и возможность работы без разделки;

небольшие габариты датчика, устанавливаемого на тракторе (примерно $50 \times 50 \times 100$ мм; вес не более 200 г);

надежная работа в условиях сварки (дуговой разряд — до 500 А; сильная засветка от плазменного факела; брызги расплавленного металла).

В качестве метода распознавания стыка было выбрано техническое зрение. Системы слежения за стыком, основанные на нем, получили широкое распространение и успешно применяются в условиях автоматической дуговой сварки крупногабаритных изделий [1] и в условиях автоматической лазерной сварки [2, 3]. Типовая система слежения за стыком состоит из цифровой видеокамеры, вычислительного блока и программного обеспечения. Камера захватывает изображения стыка; вычислительный блок по заложенному в программном обеспечении алгоритму обрабатывает видеопоток, находит характерные точки и формирует управляющий сигнал для манипулятора, перемещающего технологи-

ческий инструмент. В основном используются два подхода: анализ изображения свариваемого стыка с применением сложных алгоритмов распознавания образов [4, 5] либо использование структурированной подсветки (например, генератора лазерной линии) и относительно простых алгоритмов [6, 7]. Для реализации был выбран второй подход, известный как лазерный триангуляционный метод, из-за хорошей устойчивости к засветке и простоте алгоритмов обработки изображений.

Разработка триангуляционного датчика наведения

Триангуляционный датчик состоит из двух частей: генератора лазерной линии и цифровой видеокамеры. Во время работы датчика на свариваемый стык проецируется лазерная линия, которая считывается цифровой камерой, установленной под углом к плоскости лазерного луча. Камера и лазерный генератор жестко закреплены относительно друг друга, что позволяет откалибровать датчик и по расположению изображения на матрице видеокамеры рассчитать положение свариваемого стыка относительно датчика. Схема работы датчика показана на рис. 1.

При создании датчика системы наведения для лазерно-дугового комплекса были использованы следующие комплектующие:

цифровая видеокамера с разрешением 640×480 пикселей, скоростью съемки 60 кадров/с и интерфейсом USB;

объектив с фиксированным фокусным расстоянием 5 мм;

генератор лазерной линии на базе лазерного диода с длиной волны $\lambda = 640$ нм и $P = 50$ мВт, оборудованный цилиндрической и мощностью сферической линзами.

Исходя из требуемой точности определения стыка в 0,1 мм были выбраны компоненты видеокамеры, обеспечивающие пространственное разрешение 0,1 мм. Область захвата камеры составила 60 мм по горизонтали и 30 мм по вертикали, что достаточно для использования в составе комплекса. Стоит заметить, этого разрешающая способность датчика пропорциональна разрешению камеры и обратно пропорциональна области захвата. Это позволяет модернизировать датчик при необходимости, приспособляя его под конкретную задачу. На-

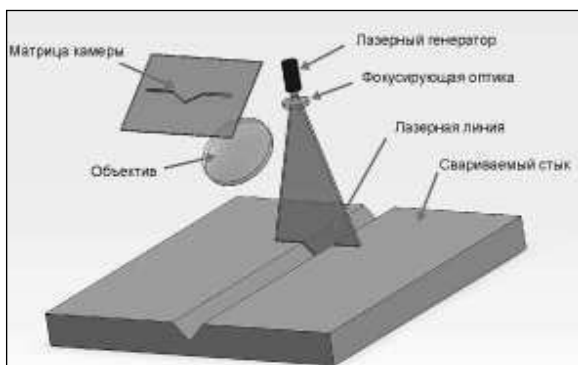


Рис. 1. Схема работы триангуляционного датчика

пример, при сварке без разделки видимая область стыка очень мала и требуется увеличить разрешающую способность датчика, что достигается заменой объектива на другой, с фокусным расстоянием 10 мм. При этом поле захвата уменьшается до 30 мм, а разрешающая способность увеличивается до 0,05мм. Камера и генератор линии были смонтированы в металлическом корпусе размером 75×40×30 мм (рис. 2).

Лазерный диод для генератора лазерной линии был выбран с учетом спектра свечения дугового разряда [8]. Использование мощных диодов увеличивает соотношение сигнал/шум и уменьшает восприимчивость датчика к помехам, однако высокие мощности излучения опасны для оператора. Поэтому был выбран компромиссный вариант в 50 мВт излучаемой мощности. Эксперименты показали, что при лазерно-дуговой сварке сталей больших толщин (мощность лазерного луча — примерно 15 кВт, мощность дугового разряда — 5 кВт) необходимо использовать дополнительные средства защиты от засветки. Поэтому в конструкцию были внесены следующие изменения:

- смонтирован защитный металлический щиток, отсекающий прямую засветку;

- перед матрицей видеокамеры установлен узкополосный интерференционный фильтр с центральной линией 640 нм и шириной 10 нм;

- установлены быстросменные защитные стекла для генератора и камеры.

Эти модификации позволили поднять соотношение сигнал/шум до приемлемого для дальнейшей обработки уровня.

Программное обеспечение системы наведения

Обработка видеосигнала с цифровой камеры проводится на промышленном компьютере системы управления комплексом, который работает под управлением операционной системы Windows 7. Конструкция сварочного трактора предусматривает установку датчика наведения впереди технологического инструмента, на расстоянии 200 мм от точки сварки. Таким образом, между моментом сканирования участка стыка и моментом его сварки проходит не менее 6 секунд (максимальная скорость сварки 2 м/мин). Поэтому использовать систему жесткого реального времени нет необходимости. Программа системы наведения была написана в среде про-

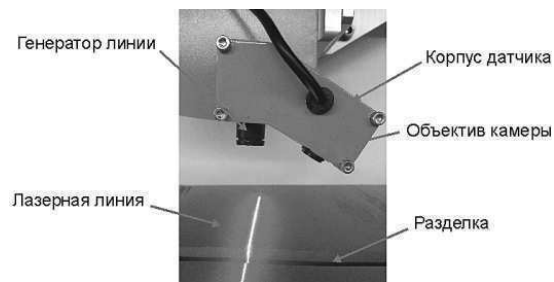


Рис. 2. Фотография датчика наведения

граммирования LabVIEW, обработка изображения проводилась с помощью встроенного пакета NI Vision, реализующего основные алгоритмы фильтрации, исправления дисторсий и поиска ключевых элементов на изображении. Качество предварительной обработки изображений определяет надежность работы алгоритмов распознавания изображений [9]. Предварительная обработка включает несколько шагов: исправление дисторсии объектива, очистку от шума и нормализацию.

Необходимо учитывать, что получаемое изображение, а именно — толщина лазерной линии на изображении, зависит от качества обработки поверхности стыка. На загрязненных, ржавых и шероховатых участках поверхности

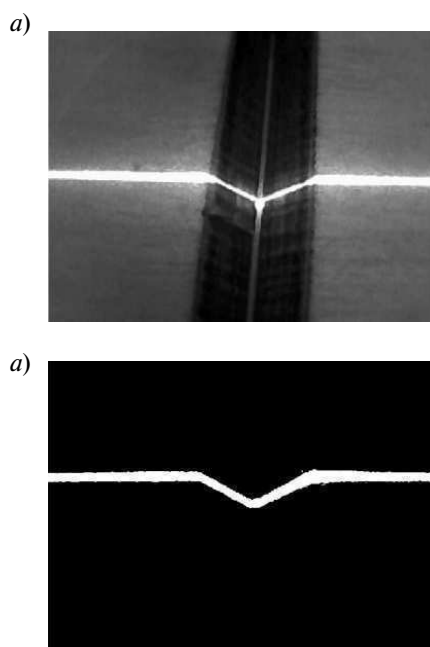


Рис. 3. Исходное изображение (а) и скорректированное (б)

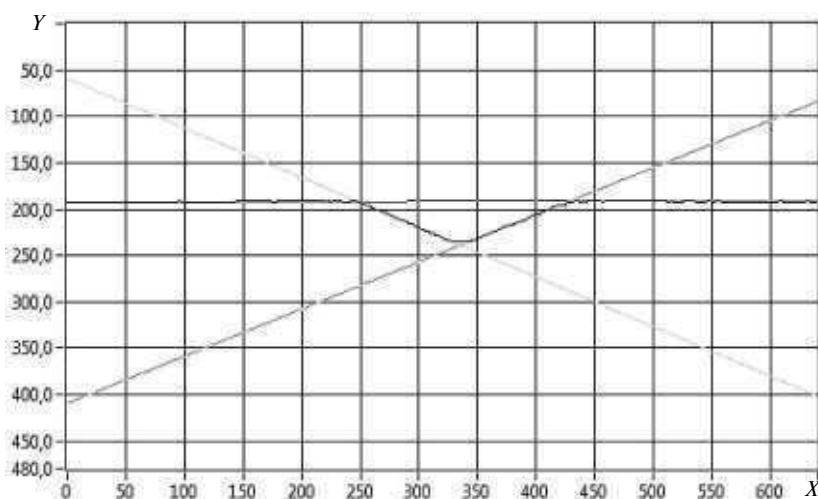


Рис. 4. Изображение разделки с искомыми отрезками

свариваемых деталей линия становится шире, чем на гладких поверхностях разделки. Чтобы нивелировать влияние этого факта, для каждого вертикального столбца изображения находится центр масс, и толстая линия переменной ширины сводится к линии из одного пикселя. На полученном изображении взвешенным методом наименьших квадратов находят отрезки прямых.

Точка пересечения двух наклонных отрезков является искомой и соответствует дну сварочной разделки. С помощью калибровочной функции координаты точки на изображении преобразуются в координаты системы позиционирования и передаются системе автоматического управления.

Точность определения положения стыка, достигаемая описанным методом, больше разрешающей способности датчика благодаря использованию статистических методов обработки данных. Суммарная ошибка составляет от $\pm 0,01$ до $\pm 0,05$ мм и сильно зависит от качества подготовки кромок свариваемого стыка.

При наведении на свариваемый стык, выполненный без разделки, алгоритм упрощается, за искомую точку берется центр «провала» лазерной линии в щель между деталями. Экспериментальные испытания показали надежное детектирование стыка при зазоре от 0,3 до 5 мм,

что соответствует реальным зазорам при лазерно-дуговой сварке.

Лазерные триангуляционные сенсоры — хорошая альтернатива традиционным контактными датчикам положения для наведения на стык при автоматической сварке металлов. В некоторых применениях, например при гибридной лазерно-дуговой сварке металлов, они обеспечивают большие точности, надежность распознавания и удобство в работе, чем контактные датчики, а с учетом прогресса в области разработки алгоритмов компьютерного зрения и в производстве цифровых камер есть большой потенциал по дальнейшему совершенствованию основных качеств. Кроме того, стоимость компонентов подобных датчиков постоянно снижается, что позволяет расширять сферу их применения [10].

Для использования в составе технологического комплекса был разработан триангуляционный датчик на основе доступной элементной базы. Он зарекомендовал себя как доступное и в то же время надежное и точное решение для задач наведения технологического инструмента на свариваемый стык.

Работа выполнена в рамках государственного контракта №14.527.12.0027 от 20.10.2011.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Suga, Y., Ishii, A. Application of image processing to automatic weld inspection and welding process control [Text] // The Japan Society of Precision Engineering.— 1998. Vol. 32, № 2.
2. Xiang Dong Gao, De Yong You. Seam Tracking Monitoring during High-Power Fiber Laser Welding [Text] // Applied Mechanics and Materials.— 2012. Vol. 201–202.— P. 69–72.
3. Xiangdong Gao, Deyong You, Seiji Katayama. Infrared image recognition for seam tracking monitoring during fiber laser welding [Text] // Mechatronics.— 2012. Vol. 22, Issue 4.— P. 370–380.
4. Xianghua Liu, Zhengyi Jiang, Jingtao Han. BP Neural Network Model for Seam Tracking Offset during High-Power Fiber Laser Welding [Text] // Advanced Materials Research.— 2011. Vol. 418–420.— P. 1464–1467.
5. Xiangdong Gao, Deyong You, Katayama, S. Seam Tracking Monitoring Based on Adaptive Kalman Filter Embedded Elman Neural Network During High-Power Fiber Laser Welding [Text] // IEEE Transactions on Industrial Electronics.— 2012. Vol. 59, Issue 11.— P. 4315–4325.
6. Haug K., Pritschow G. Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam-tracking in the shipbuilding industry [Text] / Industrial Electronics Society, 1998 // IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1998. Vol. 2.— P. 1236–1241.
7. Kim T., Lee S., Baek S., Boo K. A study on the welding seam tracking by using Laser Vision Sensor [Text].— 2010 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS).— 2010.— P. 779–782.
8. Agapiou G., Kasiouras C., Serafetinides A.A. A detailed analysis of the MIG spectrum for the development of laser-based seam tracking sensors [Text] // Optics & Laser Technology.— 1999. Vol. 31, Issue 2.— P. 157–161.
9. Haug K., Pritschow G. Reducing distortions caused by the welding arc in a laser stripe sensor system for automated seam tracking [Text] // Industrial Electronics.— ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on. 1999. Vol. 2.— P. 919–924.
10. Fernandez Villan A., Acevedo R.G., Alvarez E. [et al.]. System for Weld Tracking Based on Artificial Vision [Text] // IEEE Transactions on Industry Applications.— 2011. Vol. 47, Issue 3.— P. 1159–1167.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАБКИН Константин Дмитриевич — ведущий инженер Российско-Германского лазерного технологического центра Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: babkin.kd@mail.ru

ПЕВЗНЕР Яков Борисович — ведущий инженер Российско-Германского лазерного технологического центра Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: bezde@inbox.ru

ОСИПОВ Вячеслав Владимирович — ведущий инженер ООО «Центр лазерных технологий»; 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д.21 e-mail: slava_1981@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Андрей Владимирович — инженер научно-исследовательской лаборатории лазерных и электронно-лучевых технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: algorithm.ltd@gmail.com

AUTHORS

BABKIN Konstantin D. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: babkin.kd@mail.ru

PEVZNER Yakov B. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: bezde@inbox.ru

OSIPOV Vyacheslav V. — «Laser Technology Center», Ltd. 194064, Tihorezkiy pr. 21, St. Petersburg, Russia, e-mail: slava_1981@mail.ru

KUZNETSOV Andrey V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: algorithm.ltd@gmail.com