

УДК 621.791.75.052:007.52

Н. Г. Устинов, канд. физ.-мат. наук, А. В. Карпиленко, инж. (ВНИИЭСО, Санкт-Петербург)

ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Ключевые слова: автоматическая дуговая сварка, сварочные роботы, оптические сенсоры, адаптация, слежение, линия сварного соединения, распознавание

Роботизация и автоматизация дуговой сварки предъявляют высокие, часто трудно выполнимые требования к воспроизводимости состояния оборудования и сопрягаемых заготовок в технологическом цикле. При выполнении этих требований гарантируется надлежащее качество изделия.

К основным факторам, влияющим на потерю качества в условиях автоматической сварки, относятся отклонения траектории горелки от фактического положения линии сварного соединения (ЛСС) и геометрических параметров сварного соединения — от их номинальных значений. Практика роботизированной сварки показывает также, что даже точное отслеживание ЛСС не обеспечивает правильного центрирования сварочной ванны, необходимого для получения высококачественных изделий. Для достижения этой цели требуется подробное знание геометрии поперечного сечения сварного соединения или измерение и коррекция фактического положения самой сварочной ванны.

Устранить влияние вышеуказанных факторов, наличие которых обуславливается большими допусками на размеры заготовок, термическими деформациями, неточностью установки узла под сварку и т. д., можно посредством оснащения робота, применяемого для дуговой сварки, внешними сенсорами и путем перехода к адаптивному управлению (см., например, [1]).

Использование сенсоров во внешнем контуре управления адаптивного оборудования для автоматической и роботизированной дуговой сварки позволяет осуществлять следующие функции:

измерение двух- и трехмерного положения шва с погрешностью менее половины диаметра электродной проволоки;

определение ориентации горелки по отношению к поверхностям сварного соединения;

распознавание зоны сварного соединения для определения начала и конца сварного шва;

измерение параметров разделки, необходимых для корректировки режима сварки, в том числе при осуществлении многопроходной сварки с использованием средств адаптации.

Методы отслеживания положения ЛСС и измерения геометрических параметров сварного соединения основаны на определении положения поверхностей

заготовки, формирующих соединение, относительно сварочной горелки с размещенным на ней сенсором. Среди многочисленных используемых при дуговой сварке сенсоров различных принципов действия выполнение указанных функций в наиболее полном объеме обеспечивается оптическим сенсором.

В настоящее время большая часть усилий разработчиков средств адаптации для автоматической дуговой сварки сосредоточена на разработке визуальных систем слежения за швом, в которых используется оптический сенсор (ОС) для преобразования пространственной информации о сварном соединении в окрестности зоны сварки. В таблице представлены основные технические характеристики [2–6] зарубежных ОС, нашедших применение в промышленности. Там же приведены данные об ОС, разработанном во ВНИИЭСО (рис. 1). Более подробное описание его приводится ниже.

Недостатки оптических устройств — сложность конструкции и юстировки, сравнительно большие габаритные размеры, сложность обработки изображений и высокая стоимость — вполне компенсируются

Основные характеристики (мм) некоторых известных оптических сенсоров для дуговой сварки

Наименование сенсора, фирма-изготовитель, страна	Точность	Диапазон	Габаритные размеры
Seam Pilot, "Oldelft", Нидерланды*	±0,4	60×80	260×120×47
Lazer Track, ASEA, Швеция**	±0,6	24×24	∅ 136×132
Meta Torch 200, "Meta machines", Великобритания***	±0,2	20	∅ 57×150
MVS-30, "MVS modular vision systems", Канада	±0,3	30×30	90×70×42
ОС-3, ВНИИЭСО, Россия	±0,4	40×30	165×60×48

* В качестве осветителя использован гелий-неоновый лазер; применена механическая развертка светового луча, фоточувствительный элемент — фотодиодная линейка. ** Осветитель — полупроводниковый лазер, механическая развертка светового луча; чувствительный элемент — двухкоординатный позиционно-чувствительный фотодиод; модуляция светового луча; имеет собственную степень подвижности для вращения вокруг горелки. *** Осветитель — два полупроводниковых лазера, для структуризации освещения использована цилиндрическая оптика; чувствительный элемент — ПЗС-матрица, встроена в горелку для сварки неплавящимся электродом нахлесточных и стыковых соединений листового стали на токах до 200 А.

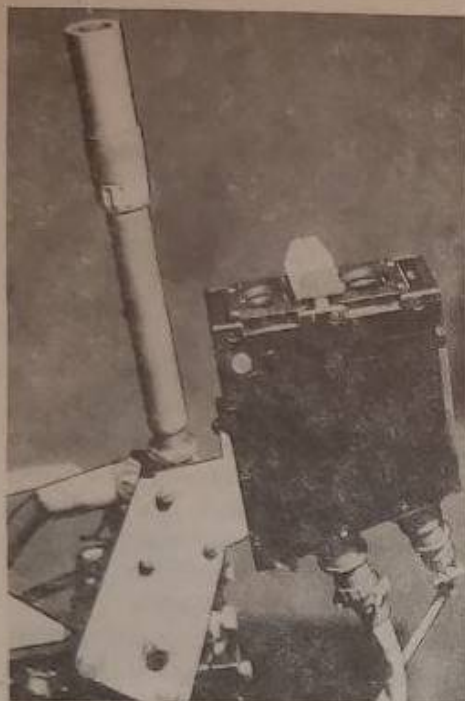


Рис. 1. Оптический сенсор ОС-3, размещенный на горелке робота для дуговой сварки

такими преимуществами, как бесконтактность, высокая информативность, универсальность.

Оптический сенсор представляет собой оптико-электронное устройство, в котором информация о положении рабочей точки горелки относительно ЛСС получается посредством обработки изображения сварного соединения в окрестности зоны сварки, которая в контролируемой области освещается лазером, встроенным в ОС.

При этом оптическая система осветителя формирует на поверхностях заготовок структуру освещенности, изображение которой сравнительно просто

может быть интерпретировано в результате цифровой обработки в реальном масштабе времени. Информацию о дальности получают с помощью метода триангуляции.

Принципиальные технические решения, использованные при разработке оптического сенсора ОС-3 во ВНИИЭСО, типичны для такого рода устройств.

Устройство ОС-3 представляет собой часть сенсорной системы, в аппаратный состав которой (рис. 2) входят оптический сенсор, программируемый контроллер, блок управления сенсором, адаптер (предпроцессор) сенсора.

Оптический сенсор содержит два основных модуля (рис. 3): 1) формирователь плоского светового луча, выполненный на основе лазерного диода 1; 2) модуль преобразователя (видеодатчик), содержащий ПЗС-матрицу 10 в качестве фоточувствительного элемента и объектив 9.

Оба модуля жестко скомпонованы в воздухоохлаждаемом кожухе.

Элементы оптической схемы обеспечивают оптическую фильтрацию, формирование освещения и изображения сцены на поверхности ПЗС-матрицы.

Формирователь плоского светового пучка 5 содержит объектив 2 и цилиндрическую линзу 3. В выбранной конструкции наклон плоского светового пучка на величину угла триангуляции по отношению к визирной оси объектива видеодатчика осуществляется оптическим клином 4.

Использование лазера ИЛПН-108 с длиной волны излучения в области 830...840 нм и с нормальной мощностью 40 мВт позволяет применять оптический сенсор при сварке в углекислом газе и аргоне, так как в данной спектральной области нет сильных эмиссионных линий и полос излучения [7].

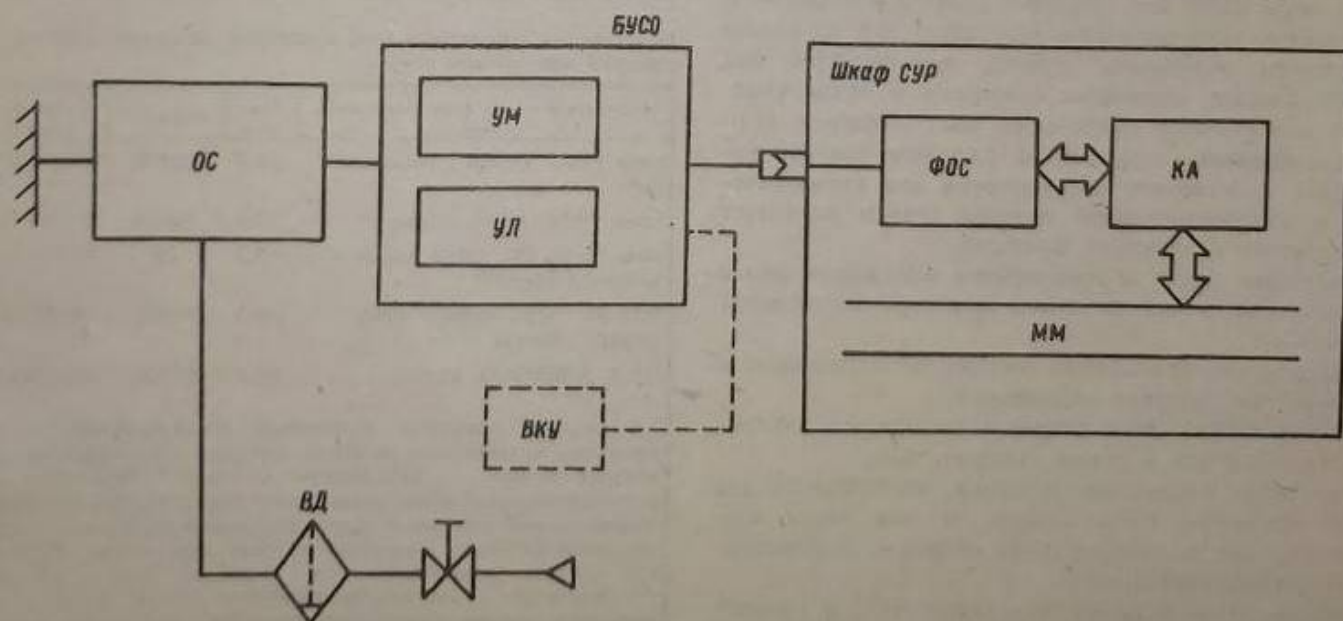


Рис. 2. Структурная схема оптического сенсора в составе системы управления робота: ОС — оптический сенсор; БУСО — блок управления оптического сенсора; УМ — узел управления ПЗС-матрицей; УЛ — узел управления лазером; ВКУ — видеоконтрольное устройство; ВД — блок связи с воздушной магистралью; СУР — система управления робота; ФОС — плата адаптера; КА — контроллер; ММ — межмашинная магистраль

Оптическая фильтрация осуществляется узкополосным интерференционным фильтром 8 с длиной волны пропускания, близкой к длине волны излучения лазера, и полушириной полосы пропускания 8...12 нм.

Видеодатчик представляет собой оптоэлектронную головку (ОГ) специализированной телекамеры «Мишень», конструктивной особенностью которой является пространственное разнесение ПЗС-матрицы со схемой управления и видеусилителем. В корпусе ОГ расположена матрица ФППЗ-13М с числом элементов в секции накопления 256×144. Размеры корпуса и выводов матрицы определяют диаметр корпуса ОГ, который равен 42 мм. Высота ОГ составляет 45 мм.

Для повышения резкости положения и наклона ПЗС-матрицы (рис. 3) выбраны в плоскости, сопряженной в пространстве изображений с плоскостью формируемого светового пучка. Масштаб репродуцирования изображения в ОС различен в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Связь координат элемента изображения светового сечения поверхностей, формирующих сварное соединение, с положением объекта в пространстве относительно ОС выражается соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} h &= h_0 + \frac{a}{x - x_0}; \\ s &= s_0 + b \frac{y - y_0}{x - x_0}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где h — расстояние от ОС до объекта; s — поперечное смещение; x, y — координаты элемента изображения в единицах дискрет ПЗС-матрицы; a, b, x_0, y_0, s_0, h_0 — параметры, определяемые при калибровке ОС.

Схема управления ПЗС-матрицы связана с оптоэлектронной головкой кабелем длиной 2...3 м и расположена в блоке управления оптического сенсора (рис. 2).

В блоке управления ОС размещается также узел питания лазера. Выходными сигналами блока являются видеосигнал и импульсы геометрической привязки. Эти сигналы поступают в формирователь оптического сенсора, который производит бинаризацию видеосигнала и вывод кода адреса засвеченных элементов в контроллер.

Цифровое представление анализируемой сцены обрабатывается в контроллере, так что выходными параметрами являются параметры разделки и координаты ЛСС в системе координат, связанной с оптическим сенсором.

Контроллер реализован на базе серийно выпускаемой одноплатной микроЭВМ с процессором K1810BM86/87, имеет ОЗУ до 128 Кбайт, ПЗУ до 64 Кбайт. Плата содержит также последовательный и параллельный интерфейсы, два программно управляемых таймера, контроллер прерываний и обеспечивает прием сигналов, поступающих от адаптера оптического сенсора, обработку и передачу полученных данных, функционирование контроллера в режимах автоматическом, калибровки, тестирования. Связь с системой верхнего уровня осуществляется через двух-

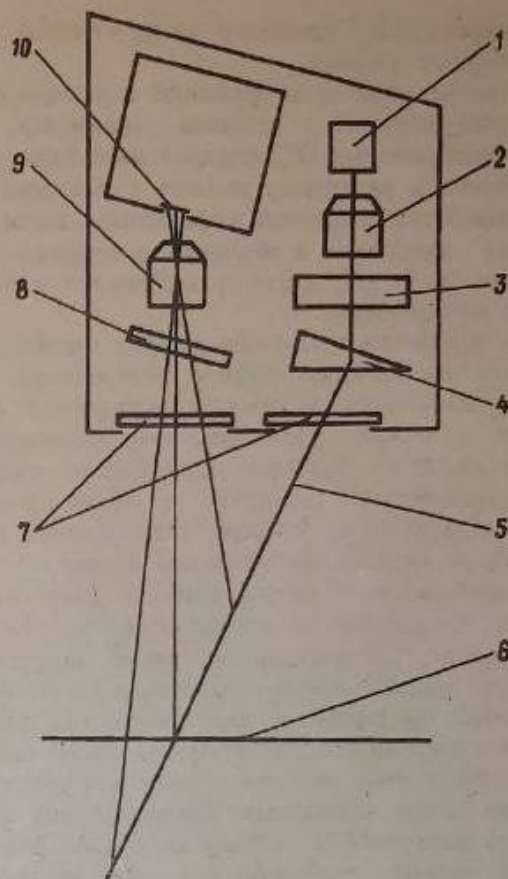


Рис. 3. Оптическая схема сенсора ОС-3: 6 — поверхность заготовки; 7 — защитные стекла (остальные обозначения см. в тексте) портовое ОЗУ. Имеется возможность связи по последовательному каналу.

При функционировании в составе системы управления СУР-01 (изготовитель — Александрийский электромеханический завод) робота для дуговой сварки контроллер является ведомым устройством [7].

В составе разработанного во ВНИИЭСО экспериментального образца системы отслеживания сварного шва, снабженной оптическим сенсором, контроллер помимо обработки сенсорных данных обеспечивает с помощью выносного пульта прием команд пользователя и управление двумя приводами, корректирующими положение сварочной головки.

В указанных случаях применения ОС все функции, не связанные с конкретным производственным предназначением, осуществляются без участия пользователя или с помощью формализованных методик.

К числу наиболее важных функций относятся следующие:

1) построение моделей сварных соединений, в том числе в окрестности конца и начала шва, для их распознавания и идентификации по сенсорным данным;

2) построение моделей конфигурации рабочей зоны и сенсоров для преобразования информации о пространственных отношениях (сенсор — среда);

3) преобразование системы координат, связанной с сенсором, в базовую систему координат (сенсор — манипулятор);

4) синхронизация процессов ввода – вывода и анализа сенсорных данных.

Выполнение указанных функций в полном объеме предполагает наличие у системы управления, в составе которой работает ОС, определенной базы знаний и способности к развитому диалогу с пользователем.

При обработке сенсорной информации, проводимой на стадиях калибровки и обучения и осуществляемой функциями 1–3, нет жестких требований к быстродействию контроллера.

Время обработки сенсорных данных минимально в автоматическом режиме работы контроллера, когда после распознавания и поиска оптический сенсор переходит в режим слежения, обеспечивающий в реальном масштабе времени определение координат ЛСС и параметров разделки, а также передачу полученных данных на уровень планирования движения робота и управления режимом сварки.

Для описываемой разработки на ввод массива цифрового представления изображения из 144 однобайтных чисел, интерпретацию, расчет координат и параметров, выдачу результата отводится 40 мс.

Исходные предпосылки для разработки быстрых алгоритмов дают априорная информация об анализируемой сцене и учет малости отклонения результатов очередного цикла сенсорных измерений как от информации, введенной в систему на стадии обучения, так и от данных, полученных в ходе предыдущего цикла измерений.

Априорную информацию получают во время обучения с помощью более сложных и медленных алгоритмов распознавания типа разделки и определения положения шва. При этом используются алгоритмы:

сегментации изображения;
поиска характерных признаков изображения, по которым можно отнести полученное изображение к одной из моделей в имеющейся базе знаний. При этом учитывается, что удовлетворительной моделью светового сечения поверхностей, образующих сварное соединение, является ломаная линия, представляющая собой совокупность отрезков прямых и криволинейных сегментов;

определения точки изображения, соответствующей ЛСС;

статистической обработки;
калибровочных преобразований.

Калибровка ОС — осуществление функции 2 — производится с помощью переносного механического стенда. В результате калибровки идентифицируется математическая модель (1).

Разработанные алгоритмы позволяют определять координаты ЛСС для 100 % кадров, полученных при

работе оптического сенсора без сварки. При наличии помех от сварки (неравномерная и нестационарная фоновая засветка, наличие в кадре помех в виде пятен и линий, пересекающих изображение анализируемой сцены) обрабатывается около 90 % кадров.

Программное обеспечение включает модули инициализации, управления, обработки изображения, драйверы связи с адаптером, микроЭВМ верхнего уровня, а также с пультом и приводами при работе в составе системы слежения.

Инициализация контроллера производится после включения питания. Здесь инициализируются таймеры, контроллер прерываний, контроллер параллельного ввода/вывода для связи с адаптером, ОЗУ, устанавливаются начальные значения переменных.

Модуль управления анализирует команды, поступающие от микроЭВМ верхнего уровня или с пульта, запускает функциональные модули и разрешает прерывания, по которым запускаются драйверы связи.

Модуль обработки изображения включает подпрограммы поиска, слежения и калибровки, которые позволяют распознавать тип сварного соединения, определять координаты ЛСС в системе координат ПЗС-матрицы и преобразовывать полученные координаты к системе координат относительно оптического сенсора.

Драйверы связи с адаптером и микроЭВМ верхнего уровня работают по прерываниям и обеспечивают бесконфликтное обращение к общим областям памяти при записи массивов, поступающих от адаптера, обработке этих массивов, получении команд и передаче результатов в микроЭВМ верхнего уровня.

При незначительных конструктивных изменениях оптический сенсор может быть использован для контроля размеров и классификации заготовок на конвейере и в случаях решения других задач автоматизации производства.

1. *Schweisroboter* / Herausgeben von G. Herden. — Berlin : VEB Verlag Technik, 1984. — 252 S.
2. *Oomen G. L., Verbeek W. J. P. A. A real-time optical profile sensor for robot arc welding* // *Robotic Welding*. — Berlin : Kempston-IFS, 1987. — P. 117–128.
3. *Davey P. G., Barrat J. W., Morris J. L. New horizons for laser stripe sensors* // *Metal Constr.* — 1987. — 19, N 12. — P. 688–691.
4. *MAG-Schweissen mit Laser-Sensoren* // *VDI-Ztg.* — 1987. — N 6. — S. 75.
5. *Edling G. Sensor-controlled arc welding in the automobile industry* // *ABB Rev.* — 1989. — N 3. — P. 19–22.
6. *Lenef A. L., Gardner C. S. Optical emissions from weld arcs and their effects on the performance of welding robot vision systems* // *Appl. Optics*. — 1985. — 24, N 16. — P. 2587–2595.
7. *Бортняков Ю. Л., Устинов Н. Г. Разработка тракта адаптации* // *Свароч. пр-во.* — 1990. — № 10. — С. 35–38.

Поступила в редакцию 16.08.91,
в окончательном варианте 24.02.92