

## СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ СТЫКОВ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В. А. КОЛЯДА, Е. В. ШАПОВАЛОВ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана стереоскопическая система технического зрения, предназначенная для измерения пространственных координат стыков. Систему можно использовать для автоматического наведения сварочного инструмента на стык при сварке робототехническими комплексами.

*Ключевые слова:* сварочное производство, автоматизация, объект сварки, стереоскопическое измерение, пространственные координаты, робототехнический комплекс, эпиллярные линии, сопряженные точки

В настоящее время при автоматизации сварочного производства наиболее часто используют оптические датчики, основанные на методе светового сечения, которое позволяет за один цикл измерения определить двухмерные координаты профиля объекта в плоскости светового сечения. Однако, когда перед проведением сварочной операции необходимо предварительно оценить пространственную ориентацию объекта, использование оптических датчиков со световым сечением вызывает существенные затруднения.

Например, при сварке с использованием робототехнических комплексов часто возникает задача, связанная с наведением сварочного инструмента на стык под прямым углом к плоскости объекта сварки, что требует определения пространственной ориентации свариваемых конструкций. Для решения такой задачи при использовании датчика со световым сечением необходимо сначала выполнить многократное сканирование разных участков поверхности объекта и затем по результатам сканирования рассчитать пространственные координаты рельефа поверхности.

Значительно упростить процедуру определения пространственной ориентации объектов сварки можно с помощью метода стереоскопического измерения, при котором определение трехмерных координат участка поверхности объекта выполняется за один такт измерения. При этом не требуется дополнительных сканирующих перемещений сенсорного блока. Известны отдельные примеры использования стереоскопических средств технического зрения в сварочном производстве. Например, американская фирма «Automatics Robotic Systems» применила бинокулярную систему для планирования траектории движения сварочной горелки при приварке вкладышей в тяжелые рамы колесных тележек бункерных вагонов во

время их ремонта [1]. Основной недостаток данной системы и всех подобных решений заключается в том, что каждая такая система ориентирована на решение ограниченного круга задач и не может быть использована для автоматизации существующих сварочных установок.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ разработана стереоскопическая система технического зрения для измерения пространственных координат стыков, которые наиболее часто встречаются в сварочном производстве. Схема сенсорного блока системы показана на рис. 1. В качестве видеодатчиков выступают две ПЗС-видеокамеры. Для подсвета поверхности объекта измерения используется источник рассеянного света, который представляет собой матрицу из лазерных светодиодов. Перед объективами каждой видеокамеры установлены светофильтры, полоса пропускания которых согласована с длиной волны излучения лазерных светодиодов. Видеосигналы от видеокамер обрабатываются в контроллере системы с помощью специального математического обеспечения.

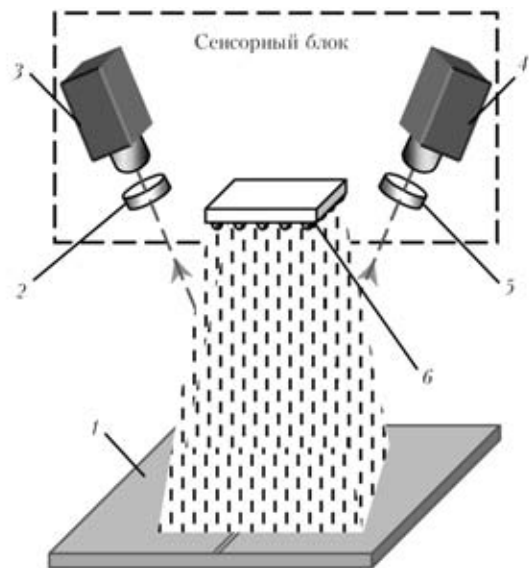


Рис. 1. Схема сенсорного блока: 1 — объект измерения; 2, 5 — светофильтр 1 и 2; 3, 4 — соответственно видеокамера 1 и 2; 6 — источник рассеянного света



Математическое обеспечение разработанной стереоскопической системы предназначено для предварительной обработки цифровых изображений; поиска сопряженных точек и определения пространственных координат точек по их изображениям.

На этапе предварительной обработки изображений выполняется выделение некоторых характерных участков на двух изображениях для их последующего отождествления. Для решения данной задачи используется нормализация и масочная фильтрация изображений. Нормализация изображений, т. е. повышение уровня их схожести, осуществляется с помощью аппаратных средств устройств видеозахвата путем изменения яркости и контрастности входных видеосигналов. Масочная фильтрация в данном случае выполняется программно и позволяет существенно снизить уровень белого шума и подчеркнуть характерные элементы на изображениях объекта.

Поиск сопряженных точек является центральной проблемой стереозрения. Задача автоматизированного поиска сопряженных точек состоит в следующем: на одном из изображений выбрана точка  $m'$ , являющаяся проекцией некоторой точки  $M$  трехмерного пространства. На втором изображении необходимо найти точку  $m''$  — проекцию той же точки. Корреляционные методы поиска сопряженных точек, которые наиболее часто используются на практике, для обработки изображений стыков являются малоэффективными, поскольку в общем случае изображение стыка имеет однородную структуру и выбранная область стыка на одном изображении может коррелироваться с несколькими областями второго изображения. Поэтому в данном случае для отождествления точек используют метод, связанный с нахождением эпиполярных линий, физический смысл которых можно сформулировать следующим образом. Если одна видеокамера «видит» точку, то можно считать, что она «смотрит» в «торец» прямой линии в пространстве. Тогда вторая видеокамера, расположенная под некоторым углом к первой, будет «видеть» прямую линию, которая содержит сопряженную точку. При известных положениях и углах наблюдения видеокамер для каждой точки на первом изображении несложно вычислить эпиполярную линию на втором изображении, что существенно снижает зону поиска сопряженных точек.

Идентификация собственных и установочных параметров видеокамер сенсорного блока осуществляется независимо для каждого видеоканала с помощью методики, представленной в работе [2]. Результатом идентификации являются две матрицы  $A_1$  и  $A_2$  размером  $4 \times 4$ , описывающие пространственное положение и ориентацию видеокамер относительно опорной системы координат. Если

положение точки в опорной системе координат задано вектором  $r_0$ , а положения той же точки в системах координат видеокамер — векторами  $r_1$  и  $r_2$ , то справедливы следующие соотношения:

$$r_0^T = A_1 r_1^T, r_0^T = A_2 r_2^T. \quad (1)$$

Для перехода от систем координат видеокамер к системам координат соответствующих изображений служит преобразование перспективы:

$$x_k^H = \frac{x_k}{z_k/d_k} + \frac{W}{2}, y_k^H = \frac{y_k}{z_k/d_k} + \frac{H}{2}, k = 1, 2, \quad (2)$$

где  $x_k^H, y_k^H$  — координаты сопряженных точек на изображениях;  $x_k, y_k, z_k$  — координаты сопряженных точек в системах координат видеокамер;  $d_k$  — расстояние от точек переднего фокуса видеокамер до начала координат опорной системы;  $W, H$  — ширина и высота изображений в пикселях;  $k$  — номер камеры.

Выражения (2) можно переписать в виде:

$$x_k = c_k^x z_k, y_k = c_k^y z_k, k = 1, 2, \quad (3)$$

где  $c_k^x = \frac{x_k^H - (W/2)}{d_k}$ ;  $c_k^y = \frac{y_k^H - (H/2)}{d_k}$ . Отсюда векторы, характеризующие положение точки в системах координат видеокамер, можно записать следующим образом:

$$r_1 = [c_1^x z_1, c_1^y z_1, z_1, 1]^T, r_2 = [c_2^x z_2, c_2^y z_2, z_2, 1]^T. \quad (4)$$

Выражения (1) можно записать в виде системы линейных уравнений (в матричной форме):

$$A_1 r_1^T = A_2 r_2^T. \quad (5)$$

Система (5) является переопределенной. Решив систему с помощью приближенного метода наименьших квадратов, получим вектор  $z = [z_1, z_2, e]^T$ , где  $e$  — значение невязки. Тогда на основании выражения (4) рассчитываются значения остальных компонентов векторов  $r_1, r_2$  и с помощью одного из соотношений (1) вычисляется вектор  $r_0$ , определяющий координаты точки в опорной системе координат. Таким образом, если известны координаты сопряженных точек на двух изображениях  $(x_1^H, y_1^H), (x_2^H, y_2^H)$  и матрицы  $A_1, A_2$ , то на основании рассмотренных выше соотношений несложно определить пространственные координаты исследуемой точки  $(x_0, y_0, z_0)$ .

Процесс поиска сопряженных точек проиллюстрирован на рис. 2 для случая стыка с зазором, близким к нулю.

На начальном этапе проводится распознавание линий стыка на изображениях, полученных от сенсорного блока, с помощью метода, описанного в

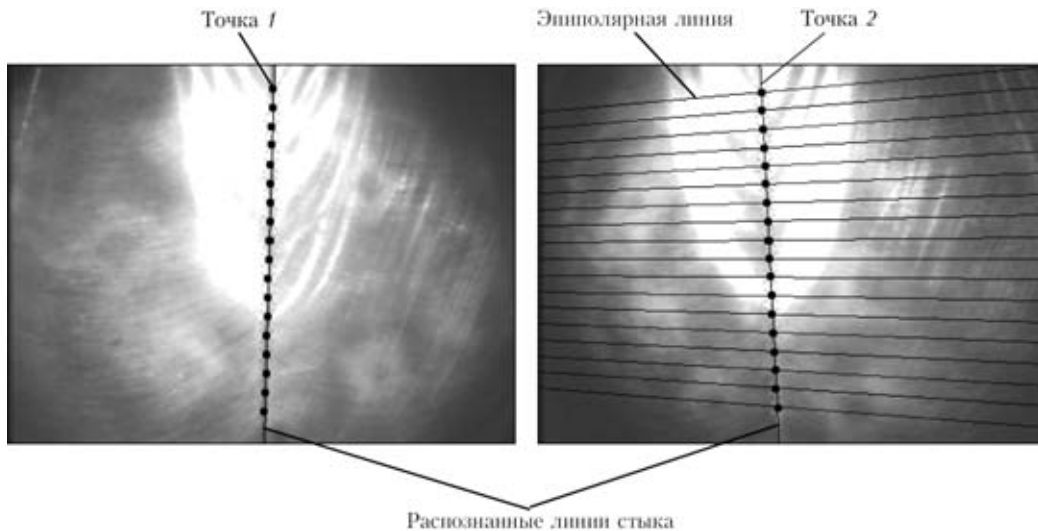


Рис. 2. Поиск сопряженных точек

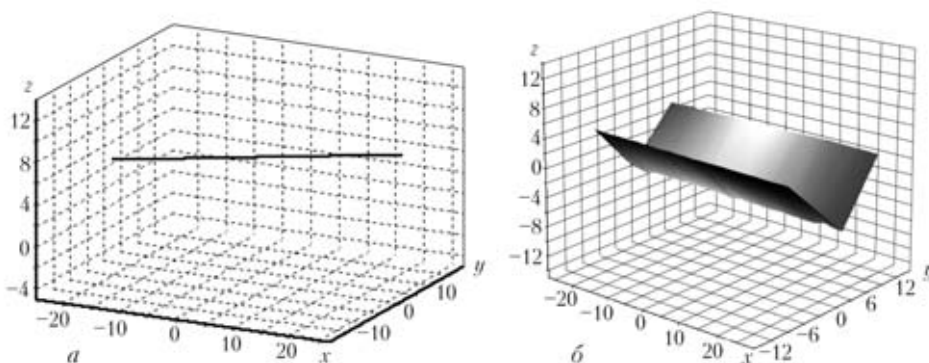
работе [3]. На линии стыка, распознанной на первом изображении, выбирается точка 1, для которой на втором изображении строится эквиполярная линия. Далее определяется точка 2, которая является результатом пересечения распознанной линии стыка на втором изображении с найденной эквиполярной линией. Точки 1 и 2 представляют собой пару сопряженных точек. Аналогично определяются остальные пары сопряженных точек, причем количество пар зависит от требуемой точности определения линии стыка.

Для каждой пары сопряженных точек формируется система линейных уравнений (5) и на основании выражений (4), (1) вычисляются координаты пространственной точки в опорной системе координат. По найденным пространственным точкам в трехмерной системе координат строится линия стыка, которая в дальнейшем может быть использована для планирования траектории движения сварочного инструмента. На рис. 3, а показан результат определения пространственного положения стыка для случая стыка с зазором, близким к нулю. В данном случае за один такт измерения получена ориентация линии стыка с приблизительной протяженностью 50 мм,

т. е. измерение координат стыка необходимо выполнять с небольшой частотой даже при максимальных скоростях сварки, что значительно снижает требования к вычислительной мощности контроллера стереоскопической системы.

Разработанные алгоритмы также позволяют определять пространственные координаты стыков с *v*-образной разделкой. Для этого на каждом изображении выполняется распознавание трех линий, которые соответствуют двум кромкам и корню разделки стыка. После определения пространственной ориентации каждой линии формируется общая геометрия стыка в опорной системе координат. На рис. 3, б показан результат стереоскопического измерения пространственных координат стыка с *v*-образной разделкой. По двум линиям кромок разделки несложно построить плоскость, определяющую ориентацию свариваемых конструкций, что может служить основой для наведения сварочного инструмента на стык под прямым углом к плоскости объекта сварки при использовании робототехнических комплексов.

Разработанная стереоскопическая система имеет несколько ограниченную область применения. Например, при разделке со скосом только одной

Рис. 3. Результаты стереоскопического измерения пространственных координат стыков: а — для стыка с зазором, близким к нулю; б — для стыка с *v*-образной разделкой кромок

кромки одна из видеокамер не сможет «увидеть» корень разделки, что не позволит определить координаты такого стыка. Но вместе с тем разработка стереоскопических средств технического зрения представляет собой перспективное направление в области автоматизации сварочных процессов, поскольку стереоскопические системы позволяют получать наибольший объем информации об объекте за один такт измерения.

1. Мошкин В. И., Петров А. А., Титов В. С., Якушенко Ю. Г. Техническое зрение роботов / Под общ. ред. Ю. Г. Якушенко. — М.: Машиностроение, 1990. — 272 с.
2. Киселевский Ф. Н., Коляда В. А. Калибровка триангуляционных оптических сенсоров. // Автомат. сварка. — 2005. — № 5. — С. 57–58.
3. Оптический сенсор для слежения за стыком при размерах зазора, близких к нулю / Ф. Н. Киселевский, Г. А. Бутаков, В. В. Долиненко, Е. В. Шаповалов // Там же. — 2003. — № 2. — С. 51–52.

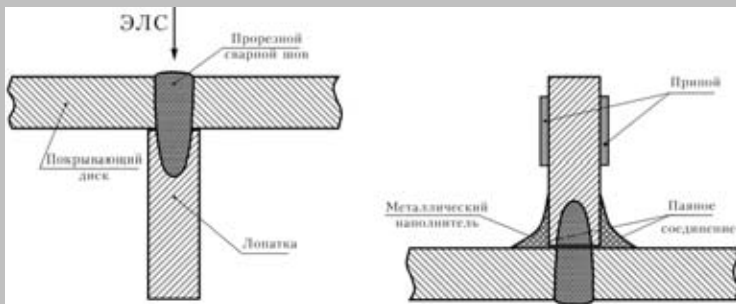
Stereoscopic technical vision system was developed to measure spatial coordinates of welded joints. The system can be applied for automatic guidance of the welding tool to a joint in welding using robotic systems.

Поступила в редакцию 07.12.2006

## КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНОПАЯНЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ



Центробежные компрессоры находят широкое применение в энергетике, химической, нефтяной, металлургической и других отраслях промышленности. Основным элементом проточной части центробежного компрессора являются рабочие колеса. Надежность и долговечность центробежного компрессора во многом зависит от сопротивления знакопеременным нагрузкам и уровня усталостной прочности материала и соединений рабочего колеса. Такое колесо состоит из двух дисков — основного, обычно с цельнофрезерованными лопатками, и покрывающего.



Разработана технология изготовления рабочих колес из высокопрочной нержавеющей и среднелегированной стали. Крепление покрывающего диска к лопаткам осуществляется наложением прорезных швов электронно-лучевой сваркой.

Непроваренные участки лопаток соединяются с покрывающим диском посредством вакуумной пайки.

При этом перед пайкой формируются галтели из металлического порошка, который затем пропитывается припоем.

По разработанной технологии изготавливаются рабочие колеса наружным диаметром от 360 до 850 мм из сталей 07X16H6 или 13XГМРБ. После балансировки колеса подвергаются разгонным испытаниям при скорости вращения на 10...15 % выше скорости вращения ротора компрессора.

**Контакты:** Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 7.

Тел.: (38044) 287 44 06

Факс: (38044) 287 12 83; 287 46 30