

А. Ю. Поливанов, канд. техн. наук, shpoliv@mail.ru, **Ю. В. Иванов**, аспирант, yuriiivanov.ieos@mail.ru,
Д. В. Холин, магистр, dimaxtail@mail.ru,
Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва

Методика преобразования координат системы технического зрения промышленного робота для операции лазерной сварки

Рассматривается проблема преобразования координат в системах технического зрения (СТЗ) роботизированных технологических комплексов (РТК) для лазерной сварки. Лазерная сварка является высокоэффективной технологической операцией, во многом превосходящей более распространенные виды сварки за счет высокой концентрации энергии в точке сварки. Однако лазерная сварка предъявляет ряд требований, в числе которых высокое требование по точности позиционирования лазерной головки, относительно сварочного стыка.

Обеспечить требуемую точность позволяют адаптивные системы управления на основе СТЗ. Основной задачей СТЗ является определение трехмерных координат сварочного стыка с помощью видеосенсора, преобразование полученных координат в систему координат, в которой происходит управление РТК, и передача преобразованных координат в систему управления. При этом важными факторами являются точности определения и преобразования координат. Для выполнения поставленной задачи необходимо рассмотреть преобразование координат как комплекс действий, выполняемых с учетом специфики применения СТЗ в составе РТК для лазерной сварки. С этой целью в статье проанализированы типовые схемы размещения СТЗ на промышленных роботах и предложена наиболее подходящая для лазерной сварки конфигурация. Также была разработана методика измерения трехмерных координат сварочного стыка с использованием СТЗ с помощью метода триангуляции.

Авторами проведен сравнительный анализ основных существующих методов калибровки видеосенсоров СТЗ и предложен оригинальный метод калибровки видеосенсоров с учетом специфики функционирования РТК для лазерной сварки. В результате в работе представлено обоснование необходимости рассмотрения преобразования координат в СТЗ в составе РТК для лазерной сварки, а также приведен комплекс методов, позволяющий выполнить преобразования из виртуальной системы координат видеосенсора в систему координат робота, что позволяет осуществлять непосредственное управление на основе данных СТЗ.

В заключение авторами приведен метод калибровки видеосенсора, позволяющий добиться указанных в статье требований по точности определения координат сварочного стыка.

Ключевые слова: система технического зрения, преобразование координат, калибровка камеры, лазерная сварка, роботизированные технологические комплексы, триангуляция, метод Цая, видеосенсоры

Введение

В современных условиях все большее внимание уделяется наукоемким и автоматизированным технологиям. Одной из таких технологий является лазерная сварка, позволяющая за счет высокой плотности мощности лазерного излучения ($10^6...10^7$ Вт/см²) получать узкий и глубокий сварной шов. Скорость сварки может достигать 150 мм/с. Также существенно снижаются сварочные деформации и повышается прочность сварных соединений [1].

Однако лазерная сварка имеет ряд особенностей, одной из которых является высокое требование по точности движения лазерной головки относительно свариваемого стыка. Согласно ГОСТ 28915—91 "Сварка лазерная импульсная. Основные типы, конструктивные элементы и размеры" основными типами сварных соединений являются: стыковое, тавровое, угловое, нахлесточное и торцевое (табл. 1).

Из анализа табл. 1 следует, что тип сварного соединения является важным параметром при

Таблица 1
Table 1
Основные типы сварных соединений
The main types of welded joints

Тип сварного соединения	Форма поперечного сечения	
	стыка	шва
Стыковое		
Тавровое		
Угловое		
Нахлесточное		

лазерной сварке. Для различных видов стыка требуется различная погрешность позиционирования лазерной головки: для нахлесточного соединения — 100...500 мкм, для остальных — не более 100 мкм. В случае лазерной сварки с погрешностью позиционирования 100 мкм и более возможна сварка без дополнительного прецизионного органа перемещения, установленного на концевом звене робота в качестве дополнительной степени подвижности.

Добиться данной точности позволяют адаптивные системы управления на основе системы технического зрения (СТЗ) [1, 2]. Их работа невозможна без решения задачи калибровки видеосенсора, поскольку оптическая система видеосенсора вносит геометрические искажения, в том числе дисторсию. Работа этих адаптивных систем заключается в вычислении трехмерных координат сварочного стыка методом триангуляции и корректировки траектории движения лазерной головки в режиме реального времени.

При роботизации лазерной сварки возникает проблема, которая заключается в том, что изначально координаты сварочного стыка в базовой системе координат робота не известны. Решить эту проблему можно с помощью предварительного измерения координат сварочного стыка в системе координат робота. Однако для выполнения данных измерений необходимо решить задачу преобразования координат, которая будет рассмотрена в этой статье.

Анализ схем размещения видеосенсоров СТЗ в РТК

Для успешного внедрения СТЗ необходимо решить ряд задач, в число которых входит

преобразование координат. Для построения системы управления промышленным роботом (ПР) и обеспечения соответствующего качества работы требуется выяснить взаимное расположение составных частей ПР с СТЗ, т. е. решить задачу преобразования координат из системы координат камеры в базовую систему координат робота. В общем случае задача преобразования координат сводится к нахождению однородной матрицы преобразования координат. При использовании СТЗ в составе ПР задачами преобразования координат являются определение расположения систем координат СТЗ в базовой системе координат и взаимосвязь виртуальной системы координат изображения с системой координат камеры.

Практика применения СТЗ в робототехнике показала эффективность использования трех типовых схем размещения видеосенсоров на роботе.

На рис. 1, а изображено неподвижное закрепление камеры над рабочей сценой. Для преобразований координат с основанием робота связывается его базовая система координат $X_6Y_6Z_6$, со схватом робота связывается подвижная система координат выходного звена робота $X_pY_pZ_p$. Координаты объекта определяются СТЗ в виртуальной системе координат изображения $X_iY_iZ_i$. Затем выполняется преобразование координат из системы $X_iY_iZ_i$ в систему координат камеры $X_kY_kZ_k$. Далее необходимо определить матрицу перехода A_{BK} из системы координат $X_kY_kZ_k$ в систему координат $X_6Y_6Z_6$.

Схема размещения камеры на концевом звене робота представлена на рис. 1, б. Этот способ размещения камеры является наиболее распространенным. Камера со своей системой координат $X_kY_kZ_k$ размещается на концевом

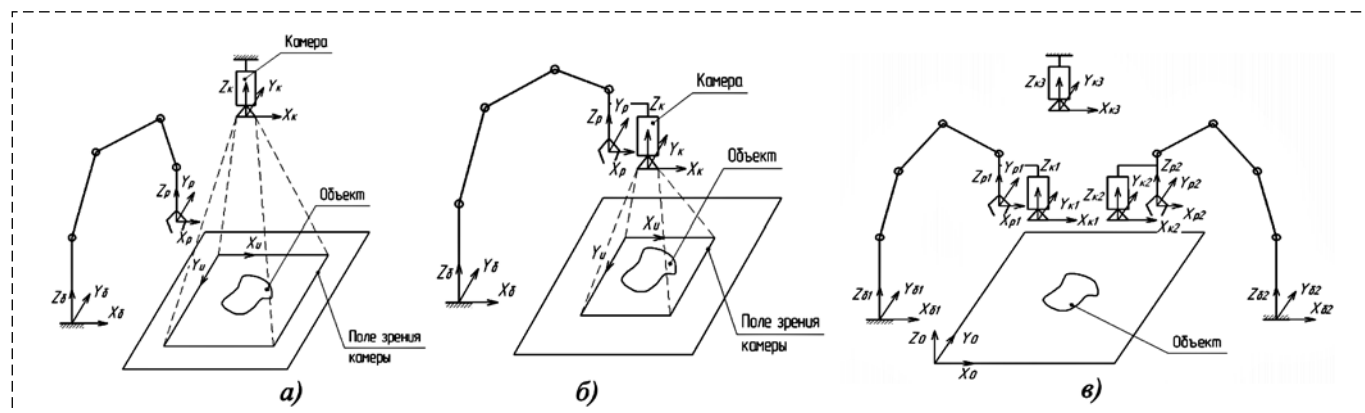


Рис. 1. Типовые схемы размещения видеосенсоров

Fig. 1. Typical videosensor placement schemes

звене робота. Измерения проводятся в виртуальной системе координат $X_{и}Y_{и}Z_{и}$ в пикселях. Затем осуществляется переход в систему координат $X_kY_kZ_k$ с помощью матрицы $A_{ки}$ и далее в базовую систему координат. В отличие от неподвижного закрепления в данном случае камера крепится к концевому звену робота, а это означает, что на точность измерений будет сказываться точность робота.

Третьим способом является комбинированный способ размещения камер (рис. 1, в). Такую схему выгодно применять для робототехнического комплекса с несколькими роботами. Неподвижная камера может приблизительно определить положение объекта в рабочей области. Далее эта информация передается в систему управления того робота, который будет работать с этим объектом. Данная схема обладает повышенной надежностью, поскольку определение координат выполняется двумя камерами.

Проведя анализ схем размещения СТЗ в составе роботизированных технологических комплексов (РТК), можно прийти к выводу, что для РТК лазерной сварки наиболее подходящей схемой размещения является крепление СТЗ на концевом звене ПР (рис. 1, б). Это обусловлено требованием к ширине поля зрения камеры. Исходя из специфики лазерной сварки для обеспечения высокой разрешающей способности СТЗ необходимо размещать видеосенсор достаточно близко к месту сварки — на концевом звене ПР. В то же время ввиду отсутствия других движущихся объектов в зоне сварки, которые могли бы перекрывать обзор, наличие дополнительных видеосенсоров, как в случае с комбинированным размещением, не требуется.

Преобразование координат в СТЗ РТК лазерной сварки

Рассмотрим задачу преобразования координат на примере оригинального устройства, разработанного авторами, для размещения лазерной сварочной головки, камеры СТЗ и лазерных подсветов на фланце робота (рис. 2).

На рис. 2 обозначено: СКИ — система координат изображения; СКК — система координат камеры; СКР — система координат выходного звена робота.

Принцип работы СТЗ следующий: камера 1, расположенная в защитном чехле 2, крепится на установочную пластину 3, которая, в свою

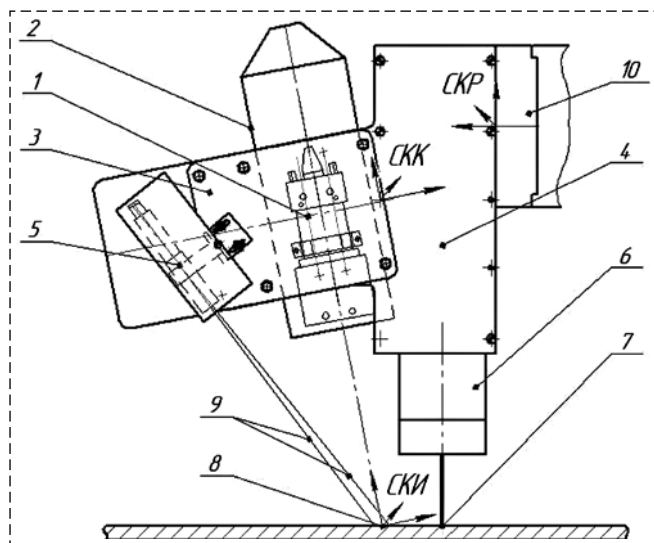


Рис. 2. Схема размещения элементов СТЗ на концевом звене робота

Fig. 2. The placement scheme of the elements of the CVS on the robot end link

очередь, крепится на корпус 4 устройства. Базирование пластины 3 к корпусу выполняется штифтами с высокой точностью. Технологическую операцию лазерной сварки непосредственно выполняет лазерная головка 6. Само устройство крепления располагается на концевом звене робота 10.

Измерение координат сварочного стыка происходит на небольшом расстоянии примерно 30 мм от места сварки 7. Для этого камера 2 располагается под углом к сварочной головке. Данное расстояние получено экспериментально, при нем обеспечивается надежная работа СТЗ.

Генераторы линии подсветки 5 проецируют на поле зрения 8 видеосенсора СТЗ лазерные лучи 9. На основе информации от видеосенсора и с учетом относительного расположения устройств генерации подсвета и камеры происходит вычисление трехмерных координат сварочного стыка методом триангуляции.

Триангуляционный метод измерения основан на расчете расстояния до объекта через соотношения треугольников. Исходя из известных данных — расстояния между генератором линии подсветки и видеосенсором, а также угла наклона генератора линии подсветки и информации с фотоматрицы видеосенсора происходит определение трехмерных координат точки пересечения сварочного стыка с линией подсвета.

Размер поля зрения камеры устанавливается таким образом, чтобы обеспечить требуемую разрешающую способность матрицы. Проведенные расчеты показывают, что для обеспече-

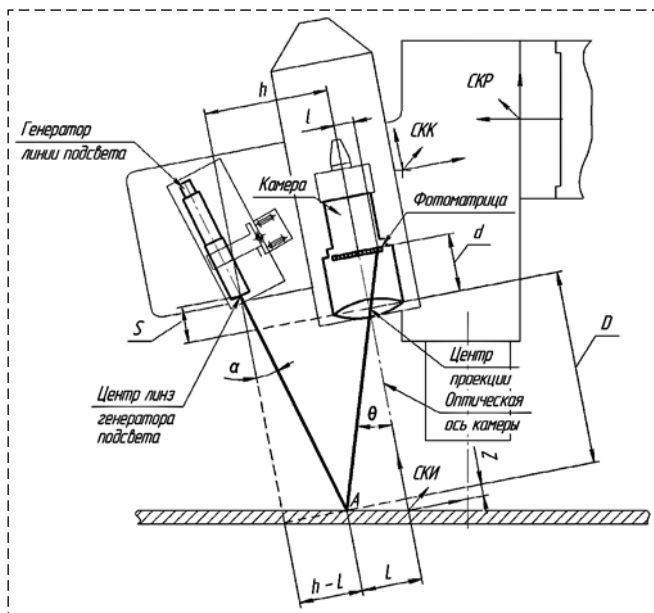


Рис. 3. Схема измерения трехмерных координат методом триангуляции

Fig. 3. The scheme of measuring three-dimensional coordinates by the method of triangulation

ния точности, требуемой для лазерной сварки, на каждый пиксель фотоматрицы должно приходиться около 30 мкм объекта. При разрешении камеры 1024×1024 пикселя добиться данного результата можно при размере поля зрения камеры 25×25 мм. Все измерения ведутся в СКИ. Схема измерения координат представлена на рис. 3.

Известными данными, определяемыми из конструкции устройства крепления, являются расстояния $S = 37,5$ мм и $h = 124$ мм между точкой фокуса камеры и центром линзы устройства генерации линии подсвета, а также угол наклона $\alpha = 27^\circ$ устройства генерации линий подсвета относительно оптической оси камеры.

Из технической документации или эмпирически определяется фокусное расстояние d камеры. Рассчитанное в результате проведения эксперимента расстояние d равно 4,46 мм.

Также в процессе работы СТЗ становятся известны пиксельные координаты (x, y) проекции отражения точки A на фотоматрицу камеры. Для упрощения рассмотрим определение лишь одной координаты точки A по оси X системы координат изображения. Вторая координата ищется аналогичным способом.

Пусть пиксельные координаты (x, y) измеряемой точки A равны $(400, 0)$. Определим длину l по формуле:

$$l = (x - u_0)l_{\pi},$$

где $u_0 = (0, 0)$ — координата главной точки; l_{π} — длина одного пикселя (мкм).

Для используемой в данной системе камеры Optronis CL600x2 $l_{\pi} = 14$ мкм. Тогда

$$l = (x - u_0)l_{\pi} = (400 - 0) \cdot 14 = 5600 \text{ мкм} = 5,6 \text{ мм}.$$

Зная длину l и фокусное расстояние видеосенсора d , определим тангенс угла θ :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{l}{d} = \frac{L}{D} = \frac{0,04}{4,46} = 0,009.$$

Дополнив формулу тангенса угла θ уравнением, выражающим тангенс угла α , получим систему уравнений с двумя неизвестными — D и L :

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \alpha = \frac{h - L}{D + S}; \\ \operatorname{tg} \theta = \frac{l}{d} = \frac{L}{D}. \end{cases}$$

Решением системы уравнений станут величины D и L , выраженные как:

$$D = \frac{h - S \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \theta} = \frac{124,05 - 37,48 \cdot 0,51}{0,51 + 0,009} = 209 \text{ мм};$$

$$L = D \operatorname{tg} \theta = 209 \cdot 0,009 = 1,86 \text{ мм}.$$

Теперь для определения координаты точки сварочного стыка в системе координат изображения переведем величины D и L в требуемую систему координат по формулам

$$Z = D - Z_s = 209 - 208,6 = 0,4 \text{ мм};$$

$$X = L - X_s = 1,86 - 0 = 1,86 \text{ мм},$$

где Z и X — координаты искомой точки в системе координат изображения; $Z_s = 208,6$ мм и $X_s = 0$ мм — координаты центра проекций видеосенсора в системе координат изображения.

Отметим, что наличие в СТЗ двух источников подсвета обусловлено необходимостью заранее определять изменение конфигурации стыка при сварки деталей со сложными контурами. В таких случаях линия подсвета, располагающаяся дальше от точки сварки, выполняет функцию детектора — если линия подсвета не попадает на стык, это сигнализирует о резком изменении контура детали в данном месте. Тогда ближняя линия подсвета выполняет определение координат стыка, который все еще находится в рабочей зоне подсвета, а дальняя линия наводится на стык с помощью робота.

Как было оговорено выше, измерение координат стыка происходит с помощью видеосенсора непосредственно в системе координат изображения. При этом очевидно, что для работы системы адаптивного управления необходимо иметь информацию о положении стыка в базовой системе координат робота. Следовательно, необходимо перевести координаты, полученные с помощью СТЗ, в базовую систему координат.

Разработчики оборудования на основе ПР с СТЗ часто выполняют преобразования координат по упрощенной методике, не затрагивая вопросы внешней и внутренней калибровок камеры. При этом значительно увеличивается погрешность позиционирования, которая может достигать ± 1 мм. Это недопустимо при высоких требованиях к точности перемещения концевой звена робота, что характерно для лазерной сварки [4].

Для решения задачи преобразования координат необходимо найти однородную матрицу преобразования $A_{БИ}$ из системы координат изображения в базовую систему координат, которая будет использоваться в системе управления роботом.

$$A_{БИ} = A_{БР} A_{РК} A_{КИ},$$

где $A_{КИ}$ — матрица преобразования из системы координат изображения в систему координат камеры; $A_{РК}$ — матрица преобразования из системы координат камеры в систему координат выходного звена робота; $A_{БР}$ — матрица преобразования из системы координат выходного звена робота в базовую систему координат.

Матрица $A_{БР}$ зависит от положения робота в пространстве и определяется решением прямой кинематической задачи. Для определения матриц $A_{РК}$ и $A_{КИ}$ используются процедуры внешней и внутренней калибровок соответственно. Данные процедуры составляют общую процедуру калибровки СТЗ в составе ПР.

Существует несколько алгоритмов общей калибровки камеры СТЗ в составе ПР, которая включает определение $A_{РК}$ и $A_{КИ}$:

- классический метод Цая;
- метод Жанга;
- метод автокалибровки.

Сущность классического алгоритма, предложенного Р. Ю. Цаем [5], заключается в последовательном определении внутренних и внеш-

них параметров камеры. Математическая модель для реализации алгоритма Цая имеет следующие параметры для оценки:

- f — фокусное расстояние камеры;
- k — коэффициент радиальных искажений линз;
- C_x, C_y — координаты центра радиальных искажений линз;
- s — масштабный коэффициент для учета любых неопределенностей, возникших вследствие несовершенства аппаратного обеспечения.

На первом этапе определяются масштабный коэффициент s и элементы матрицы $A_{КИ}$: матрица поворота и две первые компоненты вектора смещения $t = [t_x, t_y, t_z]^T$. Также на данном этапе оценивается фокусное расстояние f и компонента вектора смещения t_z . Это достигается решением системы линейных уравнений, которые включают в себя координаты точек на калибровочном шаблоне как на изображении, так и точек на реальном объекте.

Второй этап включает в себя поиск минимума рассогласований реальных и измеренных координат точек калибровочного шаблона. Он используется для определения коэффициента дисторсии k , координат центра радиальных искажений линз и коррективки f и t_z .

Алгоритм калибровки Цая является весьма эффективным и точным. Также его достоинством является отсутствие необходимости в априорных параметрах калибровки при начальном приближении. Данный метод имеет широкое распространение, так как подходит для компланарных и некомпланарных точек.

Решение, как правило, используется для калибровки с одним ракурсом, но также может применяться и для многоракурсной калибровки. Для этого плоскую модель передвигают на разные уровни по оси Z для калибровки множества изображений.

К недостаткам алгоритма калибровки Цая можно отнести невозможность распознавания асимметрии или отсутствия ортогональности проекции, учет только радиальных искажений.

Проблемы в реализации алгоритма Цая в большинстве случаев возникают на ранних этапах. Основной из них является обеспечение высокой точности изготовления и измерения калибровочного шаблона, а также нахождения точек калибровки и центра изображения. Именно данные погрешности являются основным источником неточностей, влияющих на процесс калибровки.

Алгоритм калибровки камеры, предложенный Жангом [6], получил название "гибкого" метода. Он основан на извлечении координат вершин квадратов шахматной доски для вычисления проекции преобразования между точками изображения на разных снимках.

Основные этапы алгоритма калибровки методом Жанга:

- 1) получение изображения калибровочного шаблона в различных положениях объекта относительно камеры СТЗ ПР;
- 2) обнаружение вершин квадратов на изображениях;
- 3) оценка пяти внутренних параметров и всех внешних параметров с использованием решения в аналитическом виде.

Достоинством метода Жанга является простота реализации. В отличие от классического метода здесь не требуется дорогостоящее оборудование с двумя или тремя ортогональными плоскостями, выполненными с высокой точностью. Относительное движение камеры и калибровочного поля может быть заранее не известно.

Однако качество калибровки методом Жанга несколько ниже, чем у классического метода калибровки Цая. Это вызвано влиянием ошибки печати калибровочного поля.

Еще одним методом является автокалибровка, впервые предложенная Мэйнибанком и Фаугерасом [7]. Ее суть заключается в получении калибровочных данных непосредственно по изображениям, причем на сцене не требуется присутствие специальных калибровочных объектов.

Этот метод применяется для камеры, закрепленной на концевом звене робота. Камера движется относительно технологического объекта и снимает три изображения объекта с разных позиций.

При наличии изображений с одной и той же камеры с фиксированными внутренними па-

раметрами соответствий между тремя изображениями достаточно для получения значений параметров камеры, которые позволяют провести ее автокалибровку [7].

Автокалибровка включает следующие шаги:

1. Поиск характерных точек на всех изображениях, которые наиболее точно характеризуют объект (угловые точки, центры тяжести и т. п.).
2. Поиск соответствий между изображениями. В результате на каждом изображении находится набор пикселей, которые соответствуют одним и тем же трехмерным точкам сцены.
3. На основе данных о точечных соответствиях проводится одновременный поиск параметров калибровки и трехмерных координат этих особых точек в сцене.

Автокалибровка показывает хорошие результаты, если объект имеет благоприятные для распознавания характерные точки, расположенные на всей поверхности изображения, а сами изображения получены при постоянных внешних параметрах.

Бесспорным плюсом данного метода является то, что калибровка может быть проведена в полностью автоматическом режиме.

Однако хотя этот метод является достаточно гибким, он имеет существенный недостаток — большую вычислительную сложность и большое время, которое для этого затрачивается.

Также недостатком является необходимость доступа к исходным, необработанным данным камеры, что возможно осуществить не на всех устройствах.

В результате анализа существующих методов калибровки видеокамер были выявлены достоинства и недостатки рассмотренных алгоритмов, представленные в табл. 2.

Исходя из вышесказанного было принято решение для калибровки СТЗ в составе ПР для лазерной сварки взять за основу классиче-

Таблица 2
Table 2

Сравнительный анализ методов калибровки
Comparative analysis of calibration methods

Метод	Точность калибровки	Вычислительная сложность	Особенности
Метод Цая	Высокая	Низкая	Необходим калибровочный шаблон, изготовленный с высокой точностью
Метод Жанга	Низкая	Средняя	Простота реализации, более высокая надежность по отношению к автокалибровке
Автокалибровка	Средняя	Высокая	Возможность проведения калибровки в автоматическом режиме, требуется доступ к "сырым" данным с камеры

ский алгоритм калибровки Цая. Данный выбор обуславливается высокими требованиями по точности измерения трехмерных координат сварочного стыка с помощью видеосенсора. Один из главных недостатков метода Цая — требование наличия калибровочного шаблона, выполненного с высокой точностью, — не является критичным в условиях промышленного производства. Также выбранный метод обладает меньшей вычислительной сложностью, чем метод автокалибровки, и не предъявляет специфических требований к камерам.

Алгоритм калибровки на основе метода Цая будет иметь следующий вид:

- проведение внутренней калибровки для нахождения матрицы $A_{ки}$;
- корректировка линейных отклонений и дисторсии;
- проведение внешней калибровки для нахождения матрицы $A_{рк}$.

Данный алгоритм калибровки позволяет с помощью СТЗ добиться точности определения координат сварочного стыка, необходимой для технологической операции лазерной сварки.

Заключение

Как было показано выше, лазерная сварка является перспективной альтернативой традиционным методам, но требует решения ряда специфических задач. В ходе работы авторами была разработана методика преобразования координат, в том числе была рассмотрена наиболее подходящая схема размещения СТЗ на промышленном роботе для лазерной сварки, была разработана методика определения координат сварочного стыка с помощью метода триангуляции, был проведен сравнительный анализ методов калибровки видеосенсоров СТЗ и предложен авторский метод калибровки на основе метода Цая. Также стоит отметить, что рассмотренные в статье методы имеют практическую ценность не только для СТЗ в составе РТК для лазерной сварки, но и могут быть применены для других технологических операций, выполняемых с помощью ПР и СТЗ.

Список литературы

1. Подураев Ю. В., Илюхин Ю. В., Яковлев С. Ф., Возжинский А. В. Основные аспекты создания отечественных

робототехнических комплексов лазерной сварки с адаптивной системой управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 11. С. 18—22.

2. Зарубин С. Г., Николаев П. М., Илюхин Ю. В., Подураев Ю. В., Поливанов А. Ю. Роботизированный технологический комплекс для прецизионной плазменной резки, плазменного упрочнения поверхности и нанесения защитных покрытий // Технология машиностроения. 2013. № 9. С. 48—53.

3. Подураев Ю. В., Илюхин Ю. В., Яковлев С. Ф., Возжинский А. В. Перспективы развития отечественных робототехнических комплексов лазерной сварки // Технология машиностроения. 2012. № 1. С. 32—35.

4. Поезжаева Е. В., Сергеев А. А., Мисюров М. Н. Разработка концепции адаптивного отслеживания шва в реальном времени для роботизированной сварки // Молодой ученый. 2015. № 16. С. 214—218.

5. Tsai R. Y. A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3d Machine Vision Metrology Using Off-The-Shelf TV Cameras and Lenses / R. Y. Tsai // IEEE Journal on Robotics and Automation. 1987. Vol. 3(4). P. 323—344.

6. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans. on PAMI, Vol. 22(11), 2000, pp. 1330—1334.

7. Maybank S. J., Faugeras O. D. A theory of self-calibration of a moving camera. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2):123—151.

8. Илюхин Ю. В. Реализация мехатронного подхода при построении систем компьютерного управления комплексов лазерной и плазменной резки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 10. С. 25—50.

9. Заруднев А. С., Илюхин Ю. В. Повышение производительности лазерных комплексов на основе прогноза контурной ошибки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 9. С. 52—56.

10. Faig W. Calibration of Close-Range Photogrammetry Systems: Mathematical Formulation, Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, vol. 41, no. 12, pp. 1479—1486, 1975.

11. Sturm S., Maybank S. J. On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm Singularities Applications, Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 432—437, 1999.

12. Клевалин В. А., Поливанов А. Ю. Цифровые методы распознавания в системах технического зрения промышленных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 5. С. 56.

13. Клевалин В. А., Поливанов А. Ю. Системы технического зрения в промышленной робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 9. С. 26—36.

14. Поливанов А. Ю., Шатунов К. В. Адаптивное управление роботом KUKA KR-16 с использованием системы технического зрения // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 3. С. 60—64.

15. Клевалин В. А., Поливанов А. Ю., Шатунов К. В. Повышение точности систем технического зрения промышленных роботов за счет калибровки приемника изображения // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2013. № 1(24). С. 34—38.

The Method of the Computer Vision System Coordinate Transformation for an Industrial Robot for a Laser Welding Operation

A. Y. Polivanov, shpoliv@mail.ru, Y. V. Ivanov, yuriivanov.ieos@mail.ru, D. V. Kholin, dimaxtail@mail.ru,
Moscow State Technical University "STANKIN", Moscow, 127055, Russian Federation

Corresponding author: Polivanov Aleksandr Y., Ph.D., Moscow State Technical University "STANKIN",
Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: dp940@mail.ru

Accepted on October 02, 2019

Abstract

In this article, the authors consider the problem of coordinate transformation in computer vision systems (CVS) of robotic system (RS) for laser welding. Laser welding is a highly efficient technological operation in many respects superior to common types of welding due to the high concentration of energy at the welding point. However, laser welding has a number of requirements, including a high requirement for the accuracy of positioning the laser head relative to the welding joint. Adaptive control systems based on CVS allow to provide the required accuracy. The main task of CVS is to determine the three-dimensional coordinates of the welding joint using a video sensor, convert the received coordinates into a coordinate system in which the RS is controlled, and the converted coordinates are transferred to the control system. Note, the accuracy and determination of coordinates are important factors. To accomplish this task, it is necessary to consider the coordinate transformation as a set of actions performed taking into account the specifics of using CVS as part of an RS for laser welding. For this purpose, the article analyzes typical schemes for placing CVS on industrial robots and proposes the most suitable configuration for laser welding. A methodology was also developed for measuring the three-dimensional coordinates of the welding joint using the triangulation method. The authors carried out a comparative analysis of the main existing methods for calibrating CVS video sensors and proposed an original method for calibrating videosensors taking into account the specifics of the functioning of the RS for laser welding. As a result, the article presents the rationale for the need to consider coordinate conversion to CVS as part of an RS for laser welding, as well as a set of methods that allows to perform conversions from a virtual coordinate system of a video sensor to a coordinate system of a robot, which allows direct control based on CVS data. In conclusion, the authors give a method for calibrating a video sensor, which allows achieving the requirements specified in the article for the accuracy of determining the coordinates of the welding joint.

Keywords: robotic vision system, coordinate transformation, camera calibration, laser welding, robotic system, triangulation, Tsai calibration technique, videosensors

For citation:

Polivanov A. Y., Ivanov Y. V., Kholin D. V. The Method of the Computer Vision System Coordinate Transformation for an Industrial Robot for a Laser Welding Operation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 166–173.

DOI: 10.17587/mau.21.166-173

References

1. Poduraev Y. V., Ilukhin Y. V., Yakovlev S. F., Vozhinskiy A. V. The main aspects of the creation of domestic robotic laser welding systems with an adaptive control system, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, vol. 11, pp. 18–22.
2. Zarubin S. G., Nicholaev P. M., Ilukhin Y. V., Poduraev Y. V., Polivanov A. Y. Robotic technological complex for precision plasma cutting, plasma hardening of the surface and applying protective coatings, *Engineering Technology*, 2013, vol. 9, pp. 48–53 (in Russian).
3. Poduraev Y. V., Ilukhin Y. V., Yakovlev S. F., Vozhinskiy A. V. Prospects for the development of domestic robotic laser welding systems, *Engineering Technology*, 2012, vol. 1, pp. 32–35.
4. Poezhaeva E. V., Sergeev A. A., Misurov M. N. Development of the concept of adaptive seam tracking in real time for robotic welding, *Young Scientist*, 2015, vol. 16, pp. 214–218 (in Russian).
5. Tsai R. Y. A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3d Machine Vision Metrology Using Off-The-Shelf TV Cameras and Lenses / R. Y. Tsai, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, vol. 3(4), pp. 323–344.
6. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Trans. on PAMI*, 2000, vol. 22(11), pp. 1330–1334.
7. Maybank S. J., Faugeras O. D. A theory of self-calibration of a moving camera, *International Journal of Computer Vision*, 1992, vol. 8(2), pp. 123–151.
8. Ilukhin Y. V. Implementation of the mechatronic approach in the construction of computer control systems for laser and plasma cutting systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, vol. 10, pp. 25–50 (in Russian).
9. Zarudnev A. S., Ilukhin Y. V. Improving the performance of laser systems based on the prediction of contour error, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, vol. 9, pp. 52–56 (in Russian).
10. Faig W. Calibration of Close-Range Photogrammetry Systems: Mathematical Formulation, *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 1975, vol. 41, no. 12, pp. 1479–1486.
11. Sturm S., Maybank S. J. On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm Singularities Applications, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 1999, pp. 432–437.
12. Klevalin V. A., Polivanov A. Y. Digital recognition methods in vision systems of industrial robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2008, vol. 5, pp. 56 (in Russian).
13. Klevalin V. A., Polivanov A. Y. Vision systems in industrial robotics, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, vol. 9, pp. 26–36 (in Russian).
14. Polivanov A. Y., Shatunov K. V. Adaptive robot control KUKA KR-16 using a vision system, *Electrical Complexes and Control Systems*, 2012, vol. 3, pp. 60–64 (in Russian).
15. Klevalin V. A., Polivanov A. Y., Shatunov K. V. Improving the accuracy of vision systems of industrial robots by calibrating the image receiver, *Vestnik MGTU STANKIN*, 2013, vol. 1(24), pp. 34–38 (in Russian).