

DOI: 10.18721/JCSTCS.12410
УДК 681.5

РАСЧЕТ ТОЧЕК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАЕКТОРИИ ЛАЗЕРНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ОТНОСИТЕЛЬНО ИНСТРУМЕНТА И ОСНАСТКИ В САМ

Д.В. Родионов, А.Б. Люхтер, В.Г. Прокошев

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Российская Федерация

Рассмотрены методы расчета точек технологической траектории лазерного роботизированного комплекса (ЛРК) в мировом графическом пространстве САМ относительно инструмента и подвижной оснастки. Изучены вопросы использования САМ-систем в современных лазерных роботизированных комплексах, а также представлена программная разработка. Рассмотрены основные специфики и проблемы расчета точек мирового графического пространства САМ и их соответствие расположению инструмента ЛРК и подвижной оснастки. Представлены методы расчета положения и ориентации инструмента относительно локального базиса модели детали. Предложен их расчет в системе двухосевого позиционирующего устройства ЛРК. Описан механизм определения положения угла вращения вокруг лазерного луча исполнительного механизма ЛРК, закрепленного на шестой оси подвижного фланца последнего звена промышленного робота.

Ключевые слова: CAD/CAM, САПР, система проектирования, лазерные роботизированные комплексы, лазерная сварка, промышленные роботы, промышленные лазеры, цифровизация промышленности, оффлайн программирование.

Ссылка при цитировании: Родионов Д.В., Люхтер А.Б., Прокошев В.Г. Расчет точек технологической траектории лазерного роботизированного комплекса относительно инструмента и оснастки в САМ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 4. С. 123–135. DOI: 10.18721/JCSTCS.12410

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

CALCULATION OF THE POINTS OF THE TECHNOLOGICAL TRAJECTORY OF THE LASER ROBOTIC COMPLEX RELATIVE TO THE TOOL AND TOOLING IN THE CAM

D.V. Rodionov, A.B. Lyukhter, V.G. Prokoshev

Vladimir State University name after Alexander and Nikolay Stoletovs,
Vladimir, Russian Federation

The article deals with the methods of calculating the points of the technological trajectory of the laser robotic complex (LRC) in the world graphic space CAM relative to the tool and mobile equipment. The questions of using CAM systems in modern laser

robotic systems are considered, as well as the authors own software development is presented. The main specifics and problems of calculation of points of the world graphic space CAM and their correspondence to the location of the LRC tool and mobile equipment are considered. Methods for calculating the position and orientation of the tool relative to the local basis of the part model are presented. Their calculation in the system of two-axis positioning device of LRC is offered. The mechanism of determining the position of the rotation angle around the laser beam of the LRC actuator fixed on the 6th axis of the movable flange of the last link of the industrial robot is described.

Keywords: CAD/CAM, design system, laser robotic systems, laser welding, industrial robots, industrial lasers, industry digitalization, offline programming.

Citation: Rodionov D.V., Lyukhter A.B., Prokoshev V.G. Calculation of the points of the technological trajectory of the laser robotic complex relative to the tool and tooling in the CAM. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 4, Pp. 123–135. DOI: 10.18721/JCSTCS.12410

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Использование компактных итербиевых волоконных лазеров на современных промышленных предприятиях подразумевает получение немалых преимуществ [1] и значительного расширения технических и конструкторских решений [2, 3].

В настоящее время современные комплексы [4] представляют собой объединения множества технических устройств, взаимодействующих на различных уровнях, с разной степенью отклика.

Использование систем автоматизированного проектирования в промышленном производстве является неотъемлемым тре-

бованием современного предприятия. Благодаря их применению технологи имеют возможность осуществлять цифровое проектирование процесса технологической обработки детали [5, 6]. На основе результата проектирования производится генерация управляющих программ аппаратных средств промышленного комплекса [7–9].

С проблемой использования САМ в обработке металлоизделий лазером на основе роботизированного манипулятора столкнулся коллектив авторов при автоматизации одной из своих разработок – лазерного роботизированного комплекса (ЛРК) (рис. 1).



Рис. 1. Схема лазерного роботизированного комплекса

Fig. 1. Scheme of laser robotic complex

Для выполнения требований автоматизации, предъявляемых современным промышленным предприятиям в эпоху четвертой промышленной революции [10–13], для ЛРК было решено использовать САМ-систему [14–16], которая в свою очередь должна обеспечивать следующее:

- быстрое цифровое проектирование процесса обработки как единичных, так и серийных изделий;
- моделирование движения подвижных элементов комплекса;
- обеспечение технологического и конструкторского расчета при проектировании;
- использование базы знаний для обработки конкретной детали;
- подготовку результата проектирования к предпроцессу (процессу контроля, выполняемому перед технологической обработкой);
- генерацию управляющих программ всех технических элементов промышленного комплекса, учитывая особенности возможной замены и расширения технических компонентов комплексов.

Нами был проведен анализ существующих систем автоматизированного проектирования, пригодных для использования ЛРК. Результат анализа показал, что на текущий момент существующие САМ-системы неполным образом удовлетворяют требованиям современной лазерной роботизированной обработки. Это связано с отсутствием:

- 1) возможности генерации управляющих программ технических устройств ЛРК (например, иттербиевого волоконного лазера);
- 2) возможности использования результата проектирования к подготовке программ пред- и постпроцессов (первичная корректировка, анализ результата и т. д.) лазерной роботизированной обработки изделий из металла;
- 3) возможности внедрения алгоритмов автоматизации (например, проектирование участков разгона/торможения инструмента и, как следствие, задание управляющих команд переключения сигналов оборудования по времени) лазерных технологических процессов при проектировании;

4) возможности использования базы знаний технологических режимов лазерной роботизированной обработки;

5) методов проектирования оптимальных технологических траекторий движения инструмента лазерного роботизированного комплекса;

6) методов для гибкой связи с системами контроля и управления ЛРК.

В связи с этим нами была произведена разработка и внедрение собственного прикладного САМ-продукта (рис. 2).

В ходе работы по созданию САМ-системы была выявлена необходимость в разработке методов проектирования и расчетов позиционирования *технологической траектории*¹ ЛРК в мировом графическом пространстве. Настоящая статья посвящена решению одной из задач, связанных с расчетом положения точек технологической траектории в локальном базисе модели.

Описание проблемы исследования

Исходными данными для работы с САМ является трехмерная полигональная модель детали [17]. Методы проектирования траектории на модели описаны нами в [18, 19].

На поверхности модели технолог осуществляет проектирование технологической траектории ЛРК, причем траектория в таком случае будет представлять собой последовательность точек с заданными технологическими значениями. В качестве примера параметров технологической траектории может служить иллюстрация параметров лазерной головки с навесным оборудованием (далее – инструмент) на рис. 3.

Большинство технологических параметров необходимы для генерации управляющих программ, и они подбираются технологом из базы данных режимов в зависимости от процесса и условий лазерной обработки, но такие параметры, как положение и ориентация инструмента, положение двухосевого позиционирующего устройства (далее – позиционер) требуют конструкторского подхода в системе САМ.

¹ Траектория движения ЛРК с заданными технологическими параметрами.

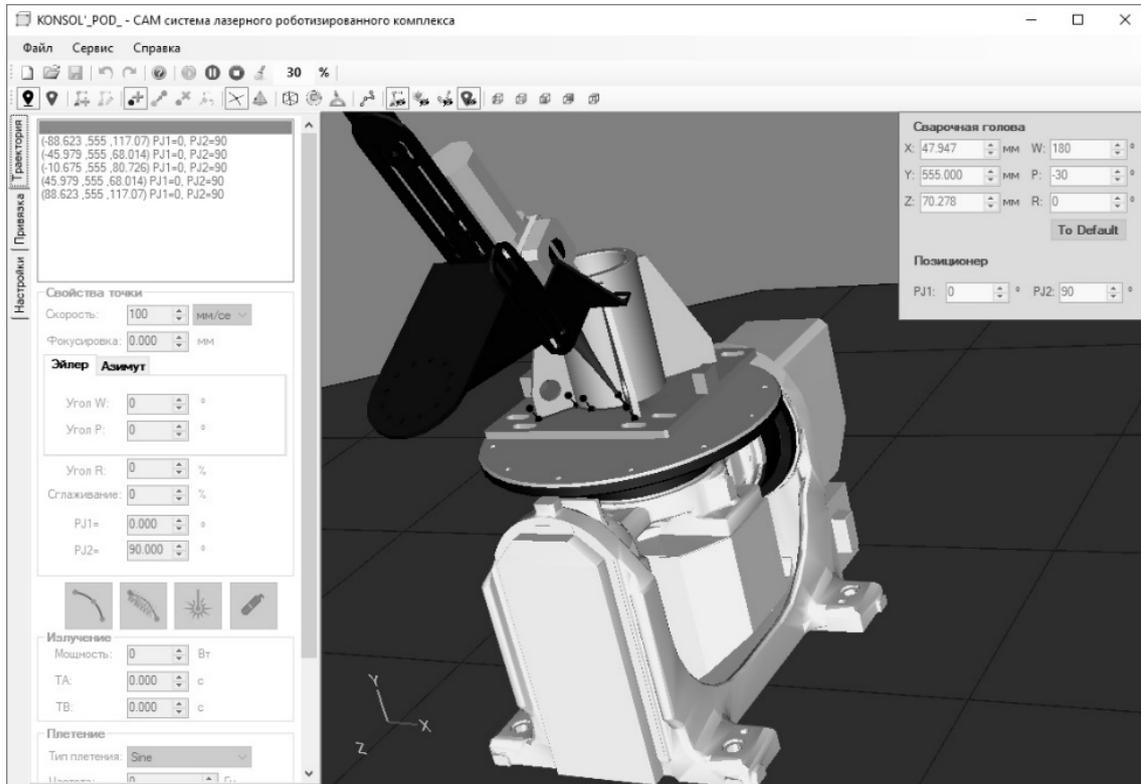


Рис. 2. CAM-система лазерного роботизированного комплекса

Fig. 2. CAM-system of laser robotic complex

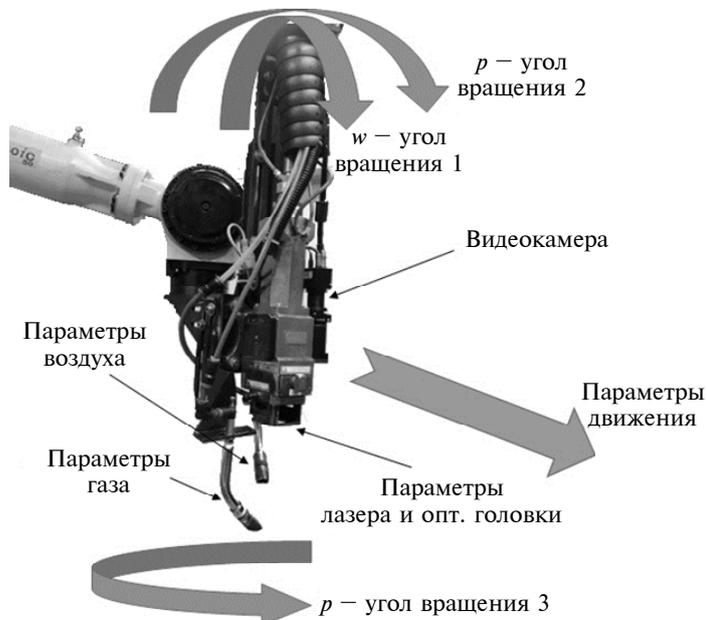


Рис. 3. Технологические параметры инструмента лазерного роботизированного комплекса

Fig. 3. The technological parameters of the laser tool of the robotic complex

Механизмы проектирования технологической траектории, разработанные и описанные нами в работе [18], не учитывают требования построения точек траектории вне поверхности детали (узлов графа полигональной модели).

Для решения задачи построения точек траектории в мировом графическом САМ-пространстве мы решили расширить функционал подсистемы моделирования движения инструмента и позиционера (подсистемы, позволяющей воспроизводить кинематику и динамику движения для спроектированной траектории), в частности, производить построение точки технологической траектории относительно инструмента ЛРК в локальном базисе модели [26].

При этом возникают следующие проблемы:

1. Точки технологической траектории представлены в локальном базисе модели, а инструмент осуществляет свое позиционирование в мировом графическом базисе.

2. Ориентация инструмента в каждой точке технологической траектории представляется в виде нормированного вектора, указывающего положение лазерного луча, а позиционирование инструмента в мировом графическом пространстве происходит в системе углов Эйлера (описывающих кинематику вращения инструмента ЛРК).

3. При переносе модели в рабочее пространство ЛРК (генерации управляющих программ), расположенной на позиционере, привязка² осуществляется в фиксированном положении позиционера. Деталь в ходе выполнения техпроцесса за счет подвижной оснастки (позиционера) может менять свое положение. Это в свою очередь требует пересчета положения точек траектории и ориентации инструмента при положениях детали, не соответствующих положению привязки.

² Привязка – процесс синхронизации детали и ее модели посредством применения математических методов расчета.

4. Для однозначного соответствия инструмента точке технологической траектории необходимо произвести расчет положения угла вращения вокруг лазерного луча инструмента ЛРК, который с технологической точки зрения должен иметь вполне конкретное значение.

Постановка задачи

Цель исследования – разработка метода расчета точек технологической траектории в мировом графическом САМ-пространстве лазерного роботизированного комплекса относительно инструмента в локальном базисе модели с учетом расположения детали в системе подвижной оснастки.

Пусть $\bar{p} = \{p_x, p_y, p_z\}$ – точка позиционирования³ (далее – TCP (Tool Center Point) (рис. 4)), $\bar{\gamma} = \{w, p, r\}$ – ориентация инструмента⁴, а J_1 и J_2 – углы вращения позиционера вокруг его осей j_1 и j_2 соответственно с нейтральным положением в осях J_1^0 и J_2^0 (рис. 5), тогда \bar{p}' – точка TCP в локальном базисе модели, а $\bar{n} = \{n_x, n_y, n_z\}$ – нормированный вектор ориентации инструмента в точке технологической траектории. При такой постановке инструмент будет иметь нейтральное положение в значениях углов Эйлера $\bar{\gamma}_0 = \{180, 0, 0\}$, а позиционер будет находиться в нейтральном положении при $J_1 = 0, J_2 = 0$.

Мы производили расчет угла вращения r инструмента вокруг лазерного луча в зависимости от направления движения \bar{d} вдоль обрабатываемой поверхности. Необходимость в таком расчете связана с требованием определенного и технологически верного расположения навесного оборудования (сопла газа и воздуха, триангуляционные датчики и т. д.) на инструменте в каждом отрезке зоны обработки.

³ В качестве точки позиционирования инструмента ЛРК выступает фокус лазерного излучения.

⁴ Ориентация представляет собой систему углов Эйлера.

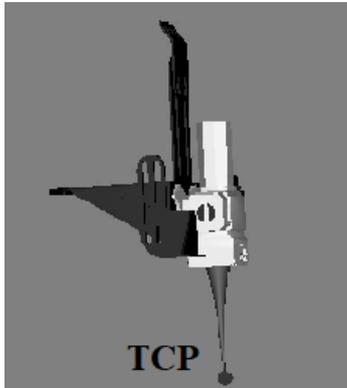


Рис. 4. Модель инструмента ЛРК с TCP в точке фокуса лазера

Fig. 4. Model tool of LRC with TCP at the laser focus point

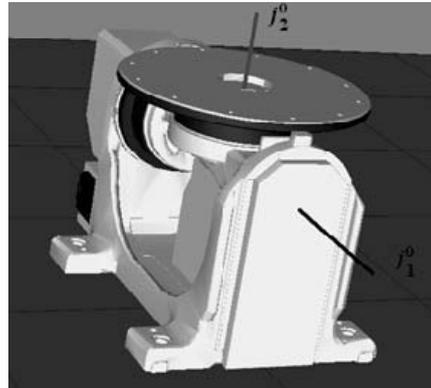


Рис. 5. Модель позиционера ЛРК с осями поворота в нулевом значении

Fig. 5. Model positioner of LRC with axes of rotation in the zero value

При построении точек относительно инструмента очевидным образом возникают ограничения, связанные с кинематикой движения инструмента и позиционера. Помимо этого авторы вносят дополнительные ограничения на область допустимых значений позиционирования главных подвижных элементов⁵ ЛРК, связанные с особенностями монтажа и использования оборудования. Все эти ограничения можно представить в следующем виде:

$$w \in [90, 180] \cup [-90, -180]; \quad (1)$$

$$p \in [-90, 90]; \quad (2)$$

$$r \in [-135, 135]; \quad (3)$$

$$J_1 \in [-135, 135]; \quad (4)$$

$$J_2 \in [-180, 180]. \quad (5)$$

Положения модели инструмента на основе которых были построены точки технологической траектории в САМ должны полностью соответствовать положениям исполнительного звена после переноса модели в рабочее пространство ЛРК. Выполнение этого условия можно использовать как критерий качества построенного решения.

В таком случае, для построения точки технологической траектории в мировом графическом пространстве относительно инструмента и подвижной оснастки ЛРК необходимо решить следующие задачи.

1. Представить положение и ориентацию инструмента в локальном базисе модели, т. е. найти преобразование $\bar{p} \rightarrow \bar{p}'$ и $\bar{v} \rightarrow \bar{v}'$.

⁵ Под главными подвижными элементами ЛРК понимается инструмент и позиционер.

2. Рассчитать значения \bar{p}' и \bar{v}' , в случае, когда модель детали располагается в системе подвижной оснастки (позиционера), используемой в ЛРК. При расчете учесть положение позиционера, при котором предполагается осуществлять привязку модели и детали.

3. Определить зависимости угла вращения инструмента r вокруг лазерного луча в зависимости от направления движения \bar{d} инструмента вдоль зоны обработки.

Решения подобного рода задач представлены в различных источниках [20–23], но материал, описанный в них, не полностью применим для решения задач настоящего исследования, т. к. расчет позиционирования и ориентации исполнительного узла ЛРК должен быть представлен в локальном базисе модели. Специфика этого требования связана с особенностями программной реализации современной САМ-системы.

Представление инструмента ЛРК в локальном базисе модели

В качестве базиса мирового графического пространства САМ взят стандартный графический декартовый базис, определяемый следующими направлениями при взгляде на пространство, не подвергнутое видovому изменению⁶: OX – влево, OY – вверх, OZ – на наблюдателя.

⁶ Изменения, подразумевающие преобразование исходного базиса (параллельный перенос, вращение и т. д.).

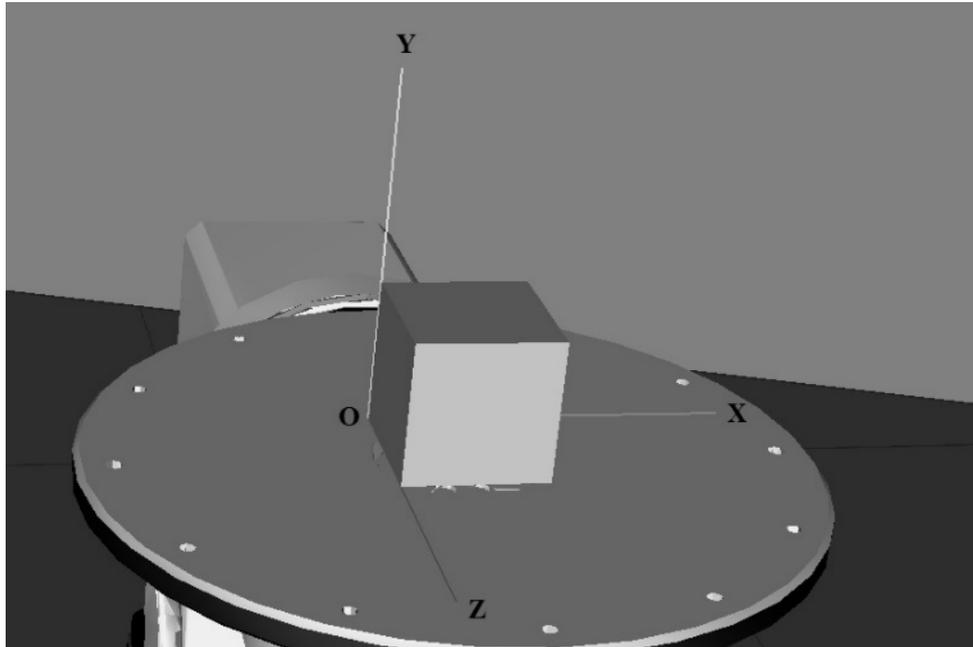


Рис. 6. Локальный базис модели куба, спроектированный относительно одной из его вершин (точка O)

Fig. 6. A local basis of a cube model designed with respect to one of its vertices (point O)

Направления базисных орт локального базиса модели (без видового изменения) совпадают с направлениями орт мирового графического пространства. В качестве начала отсчета локального базиса была выбрана точка нулевого значения координат модели. Полученный репер будем называть *локальным базисом модели* (рис. 6).

Для расчета положения инструмента \bar{p} в локальном базисе модели стоит учитывать, что модель может быть смещена и повернута относительно исходного положения. Вращение модели детали в САМ происходит вокруг осей i и j (орт OX и OY соответственно). В таком случае положение инструмента \bar{p}' относительно модели примет следующий вид:

$$\bar{p}' = \bar{p} - \bar{m}; \quad (6)$$

$$\bar{p}' = M(i, \alpha)\bar{p}'; \quad (7)$$

$$\bar{p}' = \bar{p}' + 2\bar{m}; \quad (8)$$

$$\bar{p}' = M(j, \beta)\bar{p}'; \quad (9)$$

$$\bar{p}' = \bar{p}' - 2\bar{m}, \quad (10)$$

где $M(\bar{v}, \varphi)$ – матрица поворота вокруг единичного вектора \bar{v} на угол φ .

В выражениях (6), (8) и (10) вектор \bar{m} характеризует текущее расположение модели в мировом графическом пространстве. Выражения (7) и (9) характеризуют соответствие инструмента и модели детали, осуществляющей поворот на углы α и β относительно осей i и j соответственно.

Углы ориентации инструмента ЛРК представляются в виде углов крена, тангажа и «рысканья» инструмента (повороты вокруг координатных осей OX, OY и OZ), обозначим их как w , p и r соответственно. Данная система определения ориентации в робототехнике известна, как система углов Эйлера [23, 24].

Рассмотрим вектор $\bar{n}_0 = \{0, -1, 0\}$, соответствующий значению углов Эйлера $\bar{\gamma}_0 = \{180, 0, 0\}$, нейтрального положения инструмента. Пусть мы хотим произвести поворот в системе углов Эйлера на значение $\bar{\gamma} = \{w, p, r\}$ и для него найти радиус-вектор \bar{n} . Для этого определим оси вращения $\{I, J, K\}$ в локальном базисе модели для углов $\bar{\gamma}$. В таком случае, несложно заметить, что для значений \bar{n}_0 , $\bar{\gamma}_0$ оси вращения углов

$\bar{\gamma}$ выглядят следующим образом: $i = -OX$, $j = -OY$ и $k = -OZ$. Следовательно, для определения осей углов $\bar{\gamma}$ необходимо произвести следующие преобразования:

$$K = k; \quad (11)$$

$$I = M(K, w)i; \quad (12)$$

$$J = M(I, p)M(K, w)j. \quad (13)$$

Из (11)–(13) следует, что для получения радиус-вектора \bar{n} необходимо осуществить последовательные повороты:

$$\bar{n} = M(J, r)M(I, p)M(K, w)\bar{n}_0. \quad (14)$$

Вектор \bar{n} будет представлять собой нормированный вектор ориентации инструмента ЛРК в локальном базисе модели детали, соответствующий заданным углам Эйлера $\bar{\gamma}$.

Положение и ориентация инструмента в системе подвижной оснастки ЛРК

В ЛРК заготовки деталей можно закреплять в специализированные подвижные оснастки. Это в свою очередь расширяет область доступа, а также значительно сокращает общее время обработки детали. В качестве подвижной оснастки в ЛРК выступает двухосевое позиционирующее устройство (рис. 4).

Рассмотрим задачу проектирования положения и ориентации в системе подвижной оснасткой. С точки зрения хранения данных в каждой точке технологической траектории появятся два дополнительных поля J_1 и J_2 , содержащих в себе значение поворота осей позиционера, но для генерации положения и ориентации инструмента необходимо провести пересчет.

Пусть векторы \bar{p}'_0 и \bar{n}_0 – положение и ориентация инструмента в точке технологической траектории, а j_1^0 и j_2^0 – нормированные векторы осей вращения позиционера в нейтральном положении (см. рис. 4).

В таком случае оси вращения j_1 и j_2 , соответствующие положению позиционера в углах J_1 и J_2 , будут иметь следующий вид:

$$j_1 = j_1^0; \quad (15)$$

$$j_2 = M(j_1^0, J_1). \quad (16)$$

Тогда для определения новых значений положения \bar{p}'_n и ориентации \bar{n}_n инстру-

мента необходимо осуществить поворот \bar{p}'_0 и \bar{n}_0 вокруг осей j_1 и j_2 .

Здесь же имеется особенность: поскольку при трансляции графических координат локального базиса модели в рабочую область ЛРК применяется метод переноса, описанный нами в статье [25], подразумевающий осуществление привязки модели и детали на основании трех пар точек пространства, постольку необходимо учесть значение углов J_1^0 и J_2^0 позиционера, при которых была осуществлена привязка.

В таком случае значения \bar{p}'_n и \bar{n}_n будут иметь следующий вид:

$$\bar{p}'_n = M(j_2, \pm(J_2 - J_2^0))M(j_1, \pm(J_1 - J_1^0))\bar{p}'_0; \quad (17)$$

$$\bar{n}_n = M(j_2, \pm(J_2 - J_2^0))M(j_1, \pm(J_1 - J_1^0))\bar{n}_0. \quad (18)$$

Причем в (17) и (18) знак \pm выбирается в зависимости от кинематики движения позиционирующего устройства (в какую сторону осуществляется поворот устройства).

Стоит также отметить, что существуют подвижные оснастки, осуществляющие помимо вращательных движений, линейно-поступательные. В таком случае векторы \bar{p}'_n и \bar{n}_n в каждой точке технологической траектории будут сдвинуты на заданное значение линейно-поступательного смещения.

Положение инструмента относительно лазерного луча при проектировании технологической траектории

При проектировании ориентации инструмента в точках технологической траектории не учтён один факт, заключающийся в том, что одна степень свободы робота остаётся незафиксированной (вращение вокруг инструмента, которым в данном случае является лазерный луч). С точки зрения процесса лазерной обработки для неё можно было бы выбрать произвольное значение, т. к. поворот вокруг оси лазерного луча не влияет на сам процесс. Однако имеются технологические причины задавать для этого поворота определённое значение.

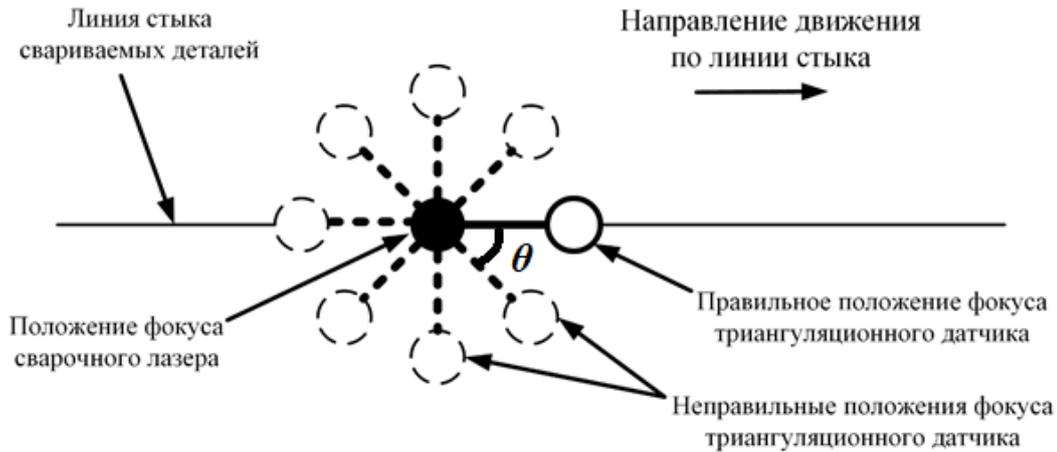


Рис. 7. Схема положения фокуса триангуляционного датчика при различном угле поворота последней оси робота (вид сверху)

Fig. 7. Diagram of the focus position of the triangulation sensor at different angles of rotation of the last axis of the robot (top view)

Изменение значения последней координаты будет приводить не только к вращению лазерной головки вокруг оси луча (что неприципиально), но и к вращению различного оборудования, смонтированного на инструменте. Пример такого оборудования – триангуляционный датчик, фокус которого вынесен в сторону от точки воздействия лазерного луча вокруг той же оси. Из этого следует, что в каждой точке технологической траектории угол поворота вокруг инструмента должен иметь определенное значение, задаваемое технологом (рис. 7).

В таком случае технолог должен задавать значение угла r в графическом пространстве САМ для каждой точки технологической траектории с учетом требуемого положения инструмента. Для автоматизации данного процесса расчет r возможно осуществить, основываясь на направлении движения инструмента.

Угол поворота r инструмента связан с направлением движения $\vec{d} = \{d_1, d_2, d_3\}$ следующим выражением:

$$\vec{d} = \{\sin(-r), \cos(-r), 0\}. \quad (19)$$

Из выражения (19) очевидным образом следует:

$$r = -\text{sign}(d_1) \cdot \arccos(d_2). \quad (20)$$

В таком случае положение угла r инструмента ЛРК вдоль направления $\vec{d}_i = p_i - p_{i-1}$

между смежными точками p_i и p_{i-1} технологической траектории с заданным отклонением на угол θ , примет следующий вид:

$$r = -\text{sign}(d_1^i \cos \theta - d_2^i \sin \theta) \times \arccos(d_1^i \sin \theta + d_2^i \cos \theta). \quad (21)$$

Выводы

Рассмотрен вопрос использования САМ-систем для промышленных лазерных роботизированных комплексов. Представлена наша программная разработка САМ-системы.

Изучена проблема построения точек технологической траектории в мировом графическом пространстве САМ относительно инструмента и подвижной оснастки ЛРК.

Для решения проблемы предложены методы расчета положения и ориентации инструмента лазерного роботизированного комплекса в локальном базисе модели.

Произведен расчет положения точек технологической траектории в системе подвижной оснастки ЛРК, построенных относительно инструмента.

Описан метод определения положения шестой оси промышленного робота (вращения инструмента вокруг лазерного луча) для задачи расчета позиционирования точки при построении технологической траектории относительно инструмента ЛРК в зависимости от направления движения вдоль зоны обработки.

Полученные результаты внедрены в САМ-систему ЛРК и успешно апробированы на лазерном роботизированном комплексе сварки. Для оценки качества полученного решения проведена серия из 16 испытаний, в ходе которых при различных положениях инструмента и позиционера производилось построение точек. Точки переносились в рабочее пространство ЛРК посредством подсистемы синхронизации модели и её детали. Результаты испытаний показали, что во всех случаях полученные значения координат полностью соответствовали спроектированным.

Результат построения точки технологической траектории относительно инструмента ЛРК в мировом графическом пространстве САМ проиллюстрирован на рис. 8. На нем изображена точка начала траектории А, успешно построенная в заданной позиции и соответствующей текущей ориентации инструмента.

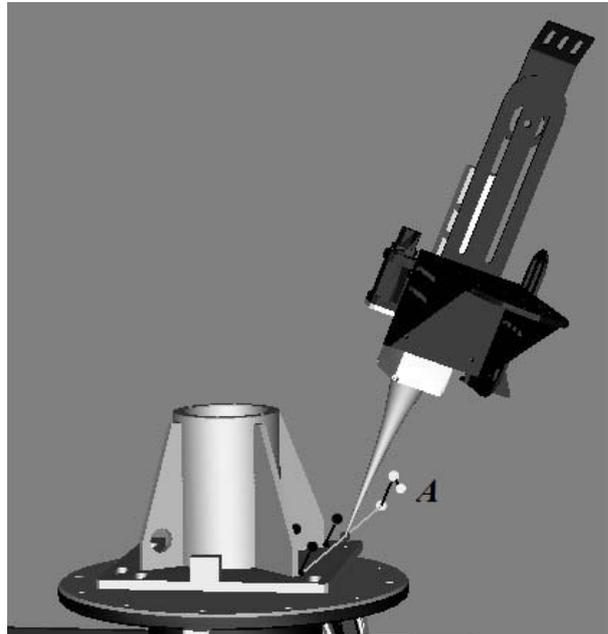


Рис. 8. Точка А, построенная на основании положения инструмента в мировом графическом пространстве САМ

Fig. 8. Point A, built on the basis of the position of the tool in the world graphic space CAM

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hui-Chi C., Guijun B., Chen-Nan S. High energy beam welding processes in manufacturing. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. 2014. Pp. 617–639. DOI: 10.1007/978-1-4471-4670-4_54
2. Игнатов А.Г. Российские лазерные технологии: состояние и перспективы применения // Ритм машиностроения. 2016. № 1. С. 26–40.
3. Lee H., Lim C.H.J., Low M.J., Tham N., Murukeshan V.M., Kim Y.J. Lasers in additive manufacturing: A review // Internat. J. of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2017. Vol. 4. Iss. 3. Pp. 307–322. DOI: 10.1007/s40684-017-0037-7
4. Григорьев С.Н., Андреев А.Г., Ивановский С.П. Современное состояние и перспективы развития промышленной робототехники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. №. 1. С. 30–34
5. Кузнецов Д.А., Чернышев М.А., Овчинникова В.А. CAD САМ-системы для промышленных роботов // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. 2017. № 35. С. 36–43
6. Авилов А.В., Каминская Ю.О., Трусова Д.С. Применение компьютерных систем для автома-

- тизации и разработки новых технологий в машиностроительном производстве // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. С. 16–22.
7. Zheng H., Cong M., Dong H., Liu Y., Liu D. CAD-based automatic path generation and optimization for laser cladding robot in additive manufacturing // The Internat. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 92. Iss. 9–12. Pp. 3605–3614. DOI: 10.1007/s00170-017-0384-0
8. Toquica J.S., Živanović S., Alvares A.J., Bonnard R. A STEP-NC compliant robotic machining platform for advanced manufacturing // The Internat. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 95. Iss. 9–12. Pp. 3839–3854. DOI: 10.1007/s00170-017-1466-8
9. Tonello S., Zanetti G.P., Finotto M., Bortolotto R., Tosello E., Menegatti E. WorkCellSimulator: A 3D simulator for intelligent manufacturing // Internat. Conf. on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. 2012. Pp. 311–322.
10. Ловыгин А.А. Будущее САМ-систем // Планета САМ 2018 // URL: http://planetacam.ru/articles/future_of_CAM.pdf (Дата обращения: 20.05.2019).

11. **Iglesias I., Sebastián M.A., Aresc J.E.** Overview of the state of robotic machining: Current situation and future potential // The Manufacturing Engineering Society Internat. Conf. MESIC. 2015. Pp. 911–917. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.577
12. **Устинова Л.Н.** Особенности развития промышленности в условиях цифровизации // Формирование цифровой экономики и промышленности: новые вызовы. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2018. С. 176–197. DOI: 10.18720/IEP/2018.2/8
13. **Bayram B., Ince G.** Advances in robotics in the era of Industry 4.0. Industry 4.0: Managing the digital transformation. 2017. Pp. 187–200. DOI: 10.1007/978-3-319-57870-5_11
14. **Mourtzis D., Makris S., Chryssolouris G.** Computer-aided manufacturing // CIRP Encyclopedia of Production Engineering. 2018. DOI:10.1007/978-3-642-35950-7_6550-4
15. **Lin W., Luo H.** Robotic welding. Handbook of manufacturing engineering and technology. 2014. Pp. 1–36. DOI: 10.1007/978-1-4471-4976-7_106-1
16. **Pan Z., Polden J., Larkin N., Duin S., Norrish J.** Automated offline programming for robotic welding system with high degree of freedoms. Advances in computer, communication, control and automation. 2011. Pp. 685–692. DOI: 10.1007/978-3-642-25541-0_86
17. **Milewski J.** Computers, solid models, and robots // Additive manufacturing of metals. Springer Series in Materials Science. 2017. Vol. 258. Pp. 99–117. DOI: 10.1007/978-3-319-58205-4_6
18. **Rodionov D., Lyukhter A., Prokoshev V.** The mechanisms of constructing trajectories of a laser robotic complex for 3D polygonal models // J. of Physics: Conf. Series. 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012007
19. **Люхтер А.Б., Родионов Д.В., Лоханов А.В.** Методы обработки информации, полученной посредством сканирования детали датчиком расстояния для оптимизации траектории // Перспективные технологии в средствах передачи информации. 2017. № 2. С. 138–141.
20. **Лесков А.Г., Бажинова К.В., Морошкин С.Д., Феоктистова Е.В.** Построение моделей кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 9. С. 58.
21. **Булгаков А.Г., Воробьев В.Ф.** Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. М.: Солон-пресс, 2011. 486 с.
22. **Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В.** Кинематика и динамика исполнительных механизмов манипуляционных роботов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 107 с.
23. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 624 с.
24. **Flores P.** Euler angles, Bryant angles and Euler parameters. Concepts and formulations for spatial multibody dynamics. 2015, Pp. 15–22. DOI: 10.1007/978-3-319-16190-7_4
25. **Люхтер А.Б., Звягин М.Ю., Голубев А.С., Родионов Д.В.** Перенос координат трехмерных САД-моделей в пространство обрабатываемых деталей в роботизированных станочных комплексах // Динамика сложных систем XXI века. 2017. Т. 11. № 1. С. 40–46.
26. **Rodionov D., Lyukhter A., Prokoshev V.** 3D modeling of laser robotic complex motion in CAM spaces // Internat. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, IEEE. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934248

Статья поступила в редакцию 20.05.2019.

REFERENCES

1. **Hui-Chi C., Guijun B., Chen-Nan S.** High energy beam welding processes in manufacturing. Handbook of manufacturing engineering and technology, 2014, Pp. 617–639. DOI: 10.1007/978-1-4471-4670-4_54
2. **Ignatov A.G.** Rossiyskiye lazernyye tekhnologii: sostoyaniye i perspektivy primeneniya [Russian laser technologies: state and prospects of application]. *Ritm Mashinostroyeniya [Rhythm Engineering]*, 2016, No. 1, Pp. 26–40. (rus)
3. **Lee H., Lim C.H.J., Low M.J., Tham N., Murukeshan V.M., Kim Y.J.** Lasers in additive manufacturing: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2017, Vol. 4, Issue 3, Pp. 307–322. DOI: 10.1007/s40684-017-0037-7
4. **Grigoryev S.N., Andreyev A.G., Ivanovskiy S.P.** Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya promyshlennoy robototekhniki [Current state and prospects of industrial robotics development]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye [Mechatronics, Automation, Control]*, 2013, No. 1, Pp. 30–34. (rus)
5. **Kuznetsov D.A., Chernyshev M.A., Ovchinnikova V.A.** CAD CAM sistemy dlya

promyshlennykh robotov [CAD CAM systems for industrial robots]. *Intellectualnyy Potentsial XXI Veka: Stupeni Poznaniya [Intellectual Potential of the XXI Century: Stages of Knowledge]*, 2017, No. 35, Pp. 36–43. (rus)

6. **Avilov A.V., Kaminskaya Yu.O., Trusova D.S.** Primeneniye kompyuternykh sistem dlya avtomatizatsii i razrabotki novykh tekhnologiy v mashinostroitel'nom proizvodstve [Application of computer systems for automation and development of new technologies in machine-building production]. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*, 2013, No. 3, Pp. 16–22. (rus)

7. **Zheng H., Cong M., Dong H., Liu Y., Liu D.** CAD-based automatic path generation and optimization for laser cladding robot in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, Vol. 92, Issue 9–12, Pp. 3605–3614. DOI: 10.1007/s00170-017-0384-0

8. **Toquica J.S., Živanović S., Alvares A.J., Bonnard R.** A STEP-NC compliant robotic machining platform for advanced manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, Vol. 95, Issue 9–12, Pp. 3839–3854. DOI: 10.1007/s00170-017-1466-8

9. **Tonello S., Zanetti G.P., Finotto M., Bortoletto R., Tosello E., Menegatti E.** WorkCellSimulator: A 3D simulator for intelligent manufacturing. *International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, 2012, Pp. 311–322

10. **Lovygin A.A.** Budushcheye CAM-sistem. Planeta CAM 2018. Available: http://planetacam.ru/articles/future_of_CAM.pdf (Accessed: 20.05.2019). (rus)

11. **Iglesias I., Sebastián M.A., Aresc J.E.** Overview of the state of robotic machining: Current situation and future potential. *The Manufacturing Engineering Society International Conference, 2015*, Pp. 911–917. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.577

12. **Ustinova L.N.** Osobennosti razvitiya promyshlennosti v usloviyakh tsifrovizatsii [Features of industry development in the conditions of digitalization]. *Formirovaniye Tsifrovoy Ekonomiki i Promyshlennosti: Novyye Vyzovy [Formation of Digital Economy and Industry: New Challenges]*. St. Petersburg: Polytechnic University Publ., 2018, Pp. 176–197. (rus) DOI: 10.18720/IEP/2018.2/8

13. **Bayram B., Ince G.** *Advances in robotics in the Era of Industry 4.0. Industry 4.0: Managing the digital transformation*. 2017, Pp. 187–200. DOI: 10.1007/978-3-319-57870-5_11

14. **Mourtzis D., Makris S., Chryssolouris G.** Computer-aided manufacturing. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. 2018. DOI:10.1007/978-3-642-35950-7_6550-4

15. **Lin W., Luo H.** *Robotic welding. Handbook of manufacturing engineering and technology*. 2014, Pp. 1–36. DOI: 10.1007/978-1-4471-4976-7_106-1

16. **Pan Z., Polden J., Larkin N., Duin S., Norrish J.** *Automated offline programming for robotic welding system with high degree of freedoms. Advances in computer, communication, control and automation*. 2011, Pp. 685–692. DOI: 10.1007/978-3-642-25541-0_86

17. **Milewski J.** Computers, solid models, and robots. *Additive Manufacturing of Metals. Springer Series in Materials Science*, 2017, Vol. 258, Pp. 99–117. DOI: 10.1007/978-3-319-58205-4_6

18. **Rodionov D., Lyukhter A., Prokoshev V.** The mechanisms of constructing trajectories of a laser robotic complex for 3D polygonal models. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012007

19. **Lyukhter A.B., Rodionov D.V., Lokhanov A.V.** Metody obrabotki informatsii, poluchennoy posredstvom skanirovaniya detali datchikom rasstoyaniya dlya optimizatsii trayektorii [Methods of processing information obtained by scanning a part with a distance sensor to optimize the trajectory]. *Perspektivnyye Tekhnologii v Sredstvakh Peredachi Informatsii [Promising Technologies in Information Transmission Media]*, 2017, No. 2, Pp. 138–141. (rus)

20. **Leskov A.G., Bazhinova K.V., Moroshkin S.D., Feoktistova Ye.V.** Postroyeniye modeley kinematiki ispolnitelnykh mekhanizmov manipulyatsionnykh robotov s ispolzovaniyem blochnykh matrits [Construction of models of kinematics of executive mechanisms of manipulative robots using block matrices]. *Inzhenernyy Zhurnal: Nauka i Innovatsii [Engineering Journal: Science and Innovation]*, 2013, No. 9, P. 58. (rus)

21. **Bulgakov A.G., Vorobyev V.F.** *Promyshlennyye roboty. Kinematika, dinamika, kontrol i upravleniye [Industrial robot. Kinematics, dynamics, control and management]*. Moscow: Solon-press, 2011, 486 p. (rus)

22. **Leskov A.G., Bazhinova K.V., Seliverstova Ye.V.** *Kinematika i dinamika ispolnitelnykh mekhanizmov manipulyatsionnykh robotov [Kinematics and dynamics of executive mechanisms of manipulation robots]*. Moscow: MGTU Publ., 2017, 107 p. (rus)

23. **Fu K., Gonsales R., Li K.** *Robototekhnika [Radioengineering]*. Moscow: Mir Publ., 1989, 624 p. (rus)

24. Flores P. *Euler angles, Bryant angles and Euler parameters. Concepts and formulations for spatial multibody dynamics*. 2015, Pp. 15–22. DOI: 10.1007/978-3-319-16190-7_4

25. Lyukhter A.B., Zvyagin M.Yu., Golubev A.S., Rodionov D.V. Perenos koordinat trekhmernykh CAD-modeley v prostranstvo obrabatyvayemykh detaley v robotizirovannykh stanochnykh kompleksakh [The transfer of coordinates of three-dimensional CAD model in the space of a

workpiece in a machining robotic complex]. *Dinamika Slozhnykh Sistem XXI Veka [Dynamics of Complex Systems-XXI Century]*, 2017, Vol. 11, No. 1, Pp. 40–46. (rus)

26. Rodionov D., Lyukhter A., Prokoshev V. 3D modeling of laser robotic complex motion in CAM spaces. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2019, IEEE. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934248

Received 20.05.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

РОДИОНОВ Дмитрий Викторович
RODIONOV Dmitrii V.
E-mail: d3391rod@gmail.com

ЛЮХТЕР Александр Борисович
LYUKHTER Alexander B.
E-mail: 3699137@mail.ru

ПРОКОШЕВ Валерий Григорьевич
PROKOSHEV Valery G.
E-mail: prokoshev_vg@vlsu.ru