

АВТОНОМНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Чумаков О.А., Кожевников М.М.

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

Предложены алгоритмы планирования траектории робота, основанные на представлении пространства поиска решения в виде ориентированного графа. Алгоритмы позволяют синтезировать плавные траектории, удовлетворяющие как технологическим, так и кинематическим ограничениям манипуляционной системы, а также ограничениям системы управления роботом.

220027 Республика Беларусь г. Минск ул.П.Бровки 6, каф.СУ, (системы управления) (017) 239-86-73 e-mail: olegchumakov@bsuir.by

Автономное программирование роботов позволяет заменить ручное обучение графическим компьютерным моделированием, при котором программа управления генерируется, как правило, в интерактивном режиме. Причем лишь в простейших случаях удается создать эту программу в автоматическом режиме, а известные алгоритмы планирования траектории робота применимы только к неизбыточным манипуляционным системам. В данной работе предлагаются алгоритмы автономного программирования для роботов с шестью степенями подвижности, которые применительно к операции резки обладают кинематической избыточностью.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. Предположим, что исходные данные для системы планирования траектории робота представлены в виде двух вектор-функций $\{\mathbf{p}(t), \mathbf{n}(t) | t \in [0; T]\}$, где t – скалярный аргумент (время); $\mathbf{p}(t) \in \mathbf{R}^3$ определяет декартовы координаты рабочей точки инструмента, а $\mathbf{n}(t) \in \mathbf{R}^3$ – единичный вектор ориентирования инструмента перпендикулярный к обрабатываемой поверхности (рис. 1). Учитывая содержательный смысл задачи, введем еще один единичный вектор $\mathbf{a}(t) = \dot{\mathbf{p}}(t) / |\dot{\mathbf{p}}(t)|$ касательный к поверхности детали и указывающий направление перемещения инструмента. Полагая, что векторы $\mathbf{a}(t)$ и $\mathbf{n}(t)$ взаимно ортогональны, в каждой точке обрабатываемой траектории можно задать систему координат, ось X которой ориентирована вдоль направления движения, ось Z ориентирована вдоль оси инструмента, а ось Y определена по правилу “правой тройки векторов” (рис. 1). Поскольку технология резки допускает произвольное вращение инструмента относительно оси луча, то локации режущего инструмента L могут быть определены с точностью до вращения вокруг вектора \mathbf{n}

$$L(t, \gamma) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_n(\gamma)_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a}(t) & \mathbf{n}(t) \times \mathbf{a}(t) & \mathbf{n}(t) & \mathbf{p}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4}; \quad t \in [0, T]; \quad \gamma \in (-\pi, \pi) \quad (1).$$

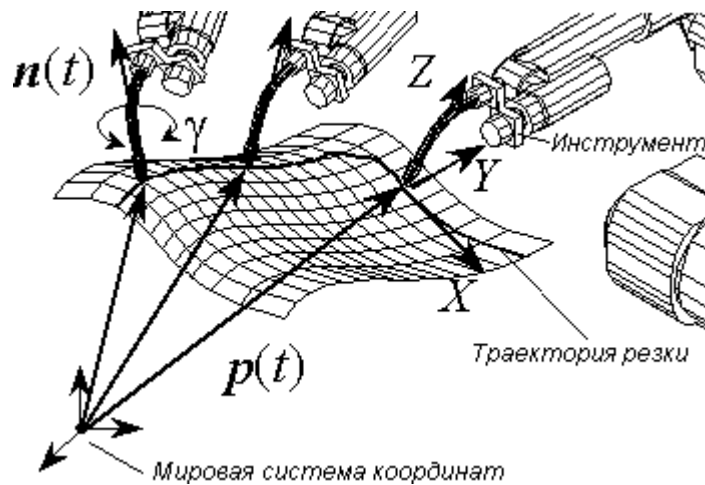


Рисунок 1 – Фреймы ориентации инструмента

В результате уравнение для локации инструмента \mathbf{L} включает один неопределенный параметр γ , который может использоваться в целях оптимизации. Действительно, технологический инструмент может вращаться вокруг оси лазерного луча без какого-либо воздействия на качество процесса, при условии, что это движение не противоречит кинематике робота и не создает возможности столкновений. Последние определяются бинарными функциями $\Psi_k(\mathbf{L})$ и $\Psi_c(\mathbf{L})$, ненулевые значения которых соответствуют нарушению заданного ограничения. Кроме того, для обеспечения плавного движения манипулятора, обходящего сингулярные конфигурации, введем еще одну бинарную функцию $\Psi_s(\mathbf{L})$, учитывающую нулевое значение допустимое расстояние до особой точки. Последнее может быть выражено как, например, нижняя грань мобильности [4].

Таким образом, рассматриваемая проблема планирования траектории робота может быть сформулирована следующим образом:

Для заданной манипуляционной задачи, описанной параметризованной однородной матрицей-функцией $\mathbf{L}(t, \gamma)$, $t \in [0; T]$, найти скалярную функцию $\gamma(t) \in (-\pi; \pi]$, которая определяет непрерывную траекторию допустимых локаций инструмента $\mathbf{L}(t, \gamma(t))$ и минимизирует или максимизирует заданный критерий качества

$$J\{\mathbf{L}(t, \gamma(t)); t \in [0; T]\} \rightarrow \min_{\gamma(t)} \quad (2)$$

при соблюдении ограничений на кинематику манипулятора, а также ограничений на близость к препятствиям и точкам сингулярности

$$\Psi_k[\mathbf{L}(t, \gamma(t))] = 0; \Psi_c[\mathbf{L}(t, \gamma(t))] = 0; \Psi_s[\mathbf{L}(t, \gamma(t))] = 0. \quad (3)$$

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА. Для рассматриваемой задачи, требующей только пять степеней свободы, избыточный параметр γ может быть использован для сглаживания траектории в пространстве обобщенных координат, для того, чтобы избежать резких поворотов режущего инструмента. Это требование может быть формализовано несколькими путями: *минимизация энергии, минимизация скорости движения суставов, минимизация диапазона изменения обобщенных координат, минимизация объема движений суставов, и т.д.* При этом, в любом случае необходимо рассматривать векторный критерий. В этой статье, не отдается предпочтение какому либо одному критерию качества или оптимизационной методике, а предлагается оставить окончательное решение до этапа проектирования, когда оно может быть выбрано следующим образом: назначение приоритета критериев критерия качества или выделение глобального критерия; применение *минимаксной* методике, то есть оптимизация самого неблагоприятного варианта; назначения *весов* для объединения компонент векторного критерия при помощи линейной функции (*метод взвешенной суммы*).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПОИСКА. В связи со сложным характером ограничений, пространство поиска оптимального решения целесообразно заменить равномерной сеткой. Такая аппроксимация преобразует эту область в направленный граф, каждый узел которого однозначно определяет 4x4 матрицу локаций инструмента \mathbf{L} и шестимерный вектор координат сочленений \mathbf{Q} . При этом ребра графа соединяют только те узлы сетки, которые соответствуют соседним точкам исходной траектории инструмента.

Для рассматриваемой задачи исходная траектория может быть задана полилинией с равномерно распределенной последовательности узлов $\{\mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i\}; i = 0:n$, где $\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i-1}\| = \Delta S; \forall i = 1:n$, и ΔS – шаг дискретизации, который должен быть достаточно мал для обеспечения желаемой аппроксимации контура. С другой стороны, существует ограничение снизу на величину ΔS , определяемое техническими характеристиками цифрового устройства управления. Аналогичный подход применим к интервалу изменения параметра $\gamma \in (-\pi, \pi]$ и разделим его на m сегментов $\gamma \in \{-\pi : 2\pi/m : \pi\}$.

При этом все соответствующие локации $\mathbf{L}[t, \gamma(t)]$ проверяются на кинематические ограничения, а также на близость к препятствиям и точкам сингулярности. В результате, после выделения только тех локаций, которые удовлетворяют ограничениям, каждый узел траектории может быть отображен в множество локаций инструмента и обобщенных координат сочленений

$$\{\mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} L_{i1}, & L_{i2}, & \dots & L_{im} \\ \hline Q_{i1}, & Q_{i2}, & \dots & Q_{im} \end{matrix} \right\}, \quad (4)$$

Следовательно, допустимое пространство поиска может быть представлено многослойным направленным графом (рис. 2) с вершинами $V = \{\mathbf{L}_{ij}\}$ и ребрами $E = \{(\mathbf{L}_{ij}, \mathbf{L}_{kl}) \mid i = k-1; \forall i, j, k, l\}$ где каждый слой соответствует определенному индексу конфигурации M . В результате, рассматриваемая задача планирования движения робота сводится к следующей оптимизационной задаче на графе.

Для заданных множеств вершин V и множеств ребер E , найти “наилучший” путь длины n

$$\Pi(\gamma_0, \dots, \gamma_n) = \langle \mathbf{L}_{0j_1} \rightarrow \mathbf{L}_{1j_2} \rightarrow \dots \mathbf{L}_{nj_n} \rangle \quad (5)$$

с начальным состоянием $V_0 \in \{\mathbf{L}_{0j}\}$ и конечным состоянием $V_n \in \{\mathbf{L}_{nj}\}$, который минимизирует заданный показатель качества.

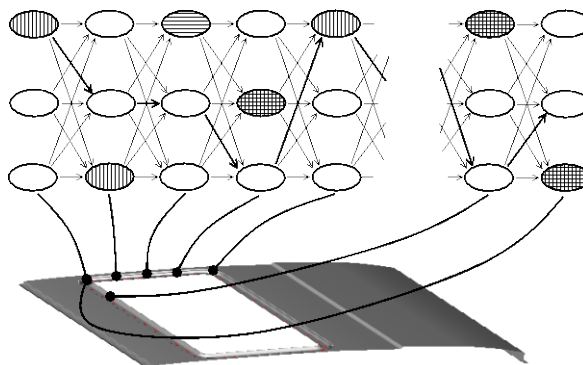


Рисунок 2 – Граф, представляющий собой пространство поиска

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ. Поскольку рассмотренные критерии качества отличаются своими свойствами (аддитивные, неаддитивные, и т.д.), то и методика оптимизации также отличается. В этом разделе предлагается несколько алгоритмов, которые

минимизируют рассматриваемые критерии качества за приемлемое на практике время. Для упрощения описания алгоритмов, обобщенные координаты, соответствующие положению L_{ij} , обозначены как $q_k(i, j)$, а траектории, соответствующие вектору решения Γ обозначены как $q_k(i, j_{\gamma_i})$. Алгоритмы в равной степени пригодны как для оптимизации в пространстве обобщенных координат q так и в пространстве углов ориентации инструмента φ , хотя описание, приведенное ниже, охватывает только первый случай.

Минимизация отклонения координат от предписанных значений. Задача оптимизации

$$J_d^{(k)}(\Gamma) = \max_i |q_k(i, j_{\gamma_i}) - r_k| \rightarrow \min_{\Gamma} \quad (6)$$

которая минимизирует отклонение k -ой обобщенной координаты относительно заданного значения r_k , может быть решена простым способом: путем выбора в каждый момент времени t_i значения $\gamma \in \Gamma_i$ которое дает локальный минимум рассматриваемого критерия. Очевидно, что такое решение также обеспечивает глобальный оптимум, хотя в общем случае он не единственен. Однако, используя предложенный многокритериальный подход, обнаруженные “критические узлы”

$$(i_r, j_r) = \arg \left(\max_i \min_j |q_k(i, j) - r_k| \right), \quad (7)$$

которые соответствуют максимальному отклонению $q_k(t)$, могут быть преобразованы в ограничения, которые учитываются на следующих шагах, когда применяются другие критерии оптимизации. В рамках предложенной формулировки, такое преобразование осуществляется простым сокращением множества Γ_i до одного элемента γ_{jo} .

Минимизация диапазона изменения координат. Задача оптимизации

$$J_{\Delta}^{(k)}(\Gamma) = \max_i [q_k(i, j_{\gamma_i})] - \min_i [q_k(i, j_{\gamma_i})] \rightarrow \min_{\Gamma}, \quad (8)$$

которая минимизирует диапазон изменения k -ой обобщенной координаты, может быть решена с помощью применения предыдущего алгоритма и нелинейного программирования. При этом вводится вспомогательная целевая функция, зависящая от параметра r_k :

$$f^{(k)}(r_k) = \max_i \left[\min_j |q_k(i, j) - r_k| \right] \rightarrow \min_{r_k}. \quad (9)$$

В этом случае, значение r_k рассматривается как середина диапазона изменения обобщенной координаты, так что оптимальное решение r_k^0 дает два “критических узла”

$$\{(i_r^+, j_r^+), (i_r^-, j_r^-)\} = \arg \left(\min_{r_k} \max_i \min_j |q_k(i, j) - r_k| \right), \quad (10)$$

которые соответствуют верхнему и нижнему уровням соответственно. Подобно предыдущему случаю, оптимальное решение не единственно, так что критические узлы могут быть также преобразованы для последующих шагов оптимизации.

Минимизация приращений координат. При дискретном представлении области поиска, величина скорости оценивается конечной разностью между соседними значениями координат. Поэтому соответствующая задача оптимизации представляется как

$$J_v^{(k)}(\Gamma) = \max_i |q_k(i, j_{\gamma_i}) - q_k(i-1, j_{\gamma_{i-1}})| \rightarrow \min_{\Gamma}, \quad (11)$$

и может быть решена средствами динамического программирования. Для доказательства предположим, что на p -ом шаге были найдены все оптимальные последовательности

$$\Gamma^o(p, \chi) = \langle \gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{p-1}, \chi \rangle, \quad (12)$$

с последним элементом $\chi \in \Gamma_p$ и соответственными показателями качества, обозначенными как $F_p(\gamma)$. Затем, для следующего шага оптимальная последовательность

$$\Gamma^o(p+1, \gamma) = \langle \gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{p-1}, \chi, \gamma \rangle, \quad (13)$$

с последним элементом $\gamma \in \Gamma_{p+1}$ может быть найдена из следующей рекурсии

$$F_{p+1}(\gamma) = \min_{\chi \in \Gamma_p} \max \{ F_p(\chi), |q_k(p+1, j_\gamma) - q_k(p, j_\chi)| \}. \quad (14)$$

Минимизация объема движения. Используя дискретное представление области поиска, эта задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$J_s^{(k)}(\Gamma) = \sum_i |q_k(i, j_{\gamma_i}) - q_k(i-1, j_{\gamma_{i-1}})| \rightarrow \min_{\Gamma}, \quad (15)$$

В отличие от предыдущего случая, это аддитивный критерий качества, который накапливается вдоль траектории. Следовательно, он также может быть минимизирован с применением динамического программирования. Используя обозначения, принятые в предыдущем разделе, соответствующая рекурсия может быть записана как

$$F_{p+1}(\gamma) = \min_{\chi \in \Gamma_p} \{ F_p(\chi), |q_k(p+1, j_\gamma) - q_k(p, j_\chi)| \}. \quad (16)$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. Предложенные в данной работе алгоритмы были реализованы в системе автоматизированного проектирования ROBOMAX (Buran Co, Russia-USA), которая представляет собой мощный инструмент для автоматизированного проектирования и автономного программирования роботизированных производственных модулей. Эта система уже успешно применяется в российской автомобильной промышленности. В частности, с ее помощью производилось проектирование роботизированных линий/модулей для производства автомобилей ВАЗ (АО АвтоВАЗ, Тольятти), грузовиков "Газель" (АО ГАЗ, Нижний Новгород). Данная САПР полностью совместима с продуктами автоматизированного проектирования фирмы Autodesk и включает ряд инструментальных средств, которые доступны пользователю для проектирования роботизированного ГП-модуля и создает управляющую программу с учетом особенностей применяемой технологии.

Применительно к технологии лазерной или плазменной резки, подсистемы Robomax/Laser (рис. 3) позволяет разработать компоновку роботизированного модуля и оптимизировать перемещение робота по векторному критерию качества.

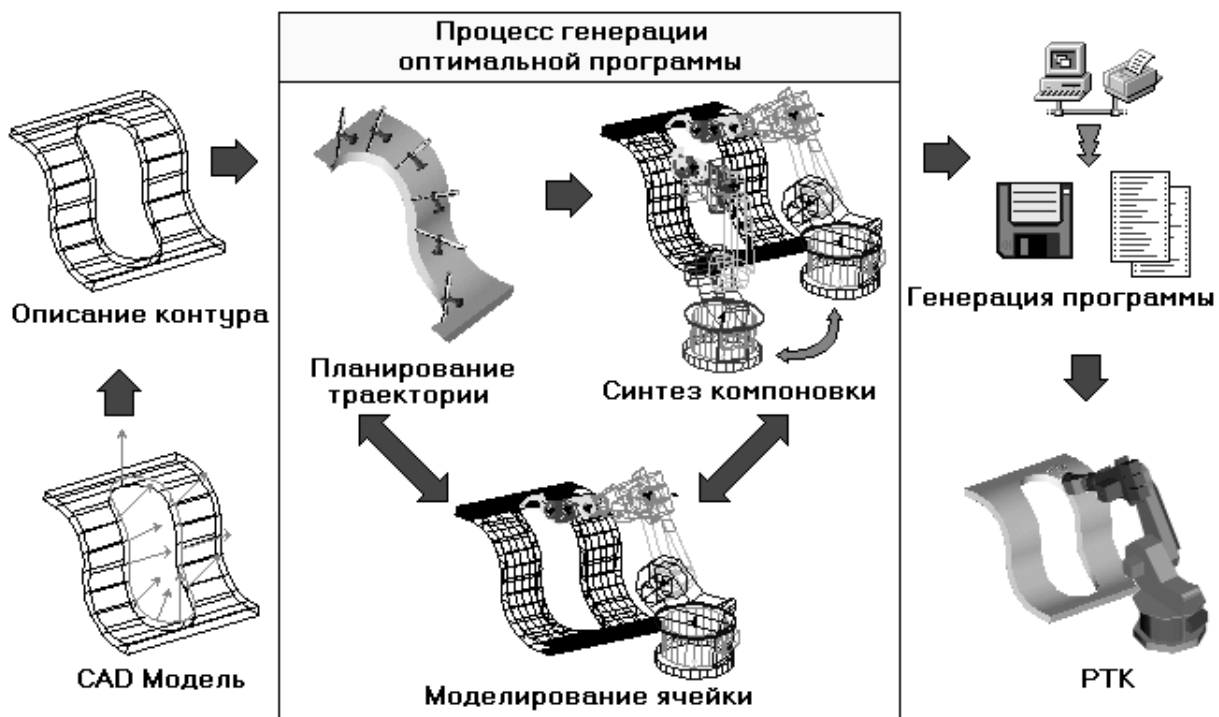


Рисунок 3 – Процесс проектирования и программирования РТК в пакете Robomax/Laser.

Одно из последних применений ROBOMAX/Laser – автономное программирование РТК резки. Блок включает робот KUKA PR161, а также необходимые механизмы фиксации и позиционирования. Этот РТК используется в мелкосерийном производстве, которое требует частого перепрограммирования. Как следует из производственного опыта, разработанные методы и алгоритмы позволяют эффективно разрабатывать программы роботизированной резки трехмерных деталей сложной формы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанные методы позволяют синтезировать оптимизированные технологические программы управления движениями робота в РТК лазерной резки с учетом кинематической избыточности манипуляционной системы. Полученные результаты были проверены при решении реальных производственных задач и позволили достичь существенного повышения экономической эффективности при мелкосерийном производстве.