

Велотренажер (рис. 4) используется как тренировочное средство. Нагрузку можно задать чисто механически, приближая электропривод к дискам или меняя давление в пневмошинах.

Были разработаны также методики технических и медицинских испытаний комплексного тренажера, после проведения которых в конструкцию экспериментального образца внесли изменения, улучшающие условия его эксплуатации и внешний вид.

В будущем планируется выпустить опытную партию комплексных тренажеров и после всесторонних технических и медицинских испытаний подготовить их серийное производство.

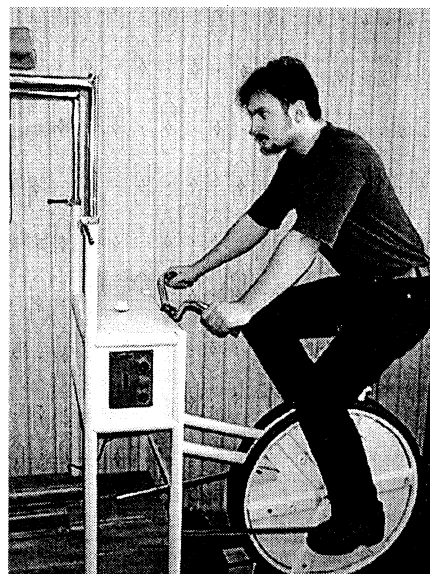


Рис. 4. Велотренажер

УДК 681.5.015

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Докт. техн. наук, проф. ПАШКЕВИЧ А. П., ассист. ЧУМАКОВ О. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

При автоматизации процесса подготовки управляющих программ для робототехнологического комплекса (РТК) лазерной резки возникает задача синтеза плавной траектории движения инструмента, оптимально использующей кинематические возможности промышленного робота. Известные алгоритмы планирования траектории применимы только к избыточным манипуляционным системам, имеющим пять степеней свободы [1–3]. В этой работе предлагается алгоритм планирования траектории для роботов с шестью степенями подвижности, которые применительно к операции резки обладают кинематической избыточностью.

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 ра-

бочей точки инструмента и $\mathbf{n}(t) \in \mathbf{R}^3$ – единичный вектор ориентации 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 – вдоль оси инструмента, а ось Y определена по правилу «правой тройки векторов» (рис. 1). Поскольку технология резки допускает произвольное вращение инструмента относительно оси луча, локации режущего инструмента $\mathbf{L}$ могут быть определены с точностью до вращения вокруг вектора $\mathbf{n}$:

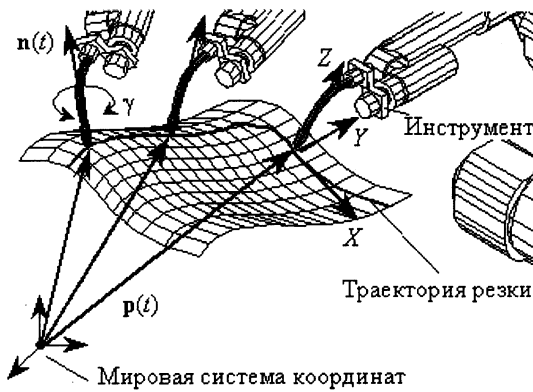


Рис. 1. Фреймы ориентации инструмента

$$\mathbf{L}(t, \gamma) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_n(\gamma)_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{a}(t) & \mathbf{n}(t) \times \mathbf{a}(t) & \mathbf{n}(t) & \mathbf{p}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4}, \quad (1)$$

$$t \in [0, T]; \gamma \in (-\pi, \pi].$$

В результате уравнение для локации инструмента $\mathbf{L}$ включает один неопределенный параметр γ , который может использоваться в целях оптимизации. При этом 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. Указанные условия определяются бинарными функциями $\Psi_k(\mathbf{L})$ и $\Psi_c(\mathbf{L})$, ненулевые значения которых соответствуют нарушению данного ограничения. Кроме того, для обеспечения плавного движения манипулятора, обходящего сингулярные конфигурации, введем еще одну бинарную функцию $\Psi_s(\mathbf{L})$, учитывающую допустимое расстояние до особой точки [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 заданный критерий качества

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

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

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

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

В результате геометрическая интерпретация задачи может быть представлена как поиск лучшей траектории на плоскости (γ, t) , огибающей запрещенные области недопустимых значений, в которых нарушаются ограничения. Необходимо также отметить, что для этой проблемы невозможно определить в явном виде начальную и конечную локацию, которые должны быть связаны допустимой траекторией (они определены с точностью до отрезков прямой). Таким образом, задача синтеза траектории резки сводится к нахождению некоторой оптимальной кривой в двумерном пространстве с запретными областями и линейными граничными условиями.

Критические качества. Для рассматриваемой задачи, требующей только пять степеней свободы, избыточный параметр γ может быть использован для сглаживания траектории в пространстве обобщенных координат, чтобы избежать резких поворотов режущего инструмента. Это требование может быть формализовано несколькими путями: минимизация скорости движения суставов, минимизация диапазона изменения обобщенных координат, минимизация объема движений суставов и т. д. Однако в любом случае необходимо рассматривать векторный критерий качества.

Для типичного промышленного робота, который обладает шестью степенями свободы, отображение из пространства задания $\{\mathbf{L}\}$ в пространстве обобщенных координат $\{\mathbf{Q}\}$ описывается решением обратной задачи кинематики $\mathbf{Q} = \text{InvKin}(\mathbf{L}, \mathbf{M})$, которая параметризуется индексом конфигурации $\mathbf{M}$. При этом для обеспечения непрерывности траектории все используемые решения должны иметь одинаковый индекс

конфигурации (т. е. принадлежать одному топологическому подмножеству)

$$Q(t, \gamma, M) = \text{InvKin}[L(t, \gamma), M], t \in [0; T], \quad (4)$$

которые должны рассматриваться отдельно во время оптимизации. Кроме того, определим аналогичное пространство для углов ориентации инструмента

$$\Phi(t, \gamma, M) = \text{ToolAng}[L(t, \gamma), M], t \in [0; T], \quad (5)$$

конкретный смысл которых зависит от производителя роботов.

Таким образом, для заданного индекса конфигурации M функция $\gamma(t)$ определяет шесть траекторий суставов $q_k(t)$, $k = 1, \dots, 6$, каждая из которых может быть оценена следующими критериями качества:

- диапазоном изменения обобщенных координат

$$J_{\Delta}^{(k)}[q(t)] = \max_t [q_k(t)] - \min_t [q_k(t)]; \quad (6)$$

- отклонением обобщенных координат от предписанных значений r_i

$$J_d^{(k)}[q(t)] = \max_t |q_k(t) - r_k|; \quad (7)$$

- объемом движений по обобщенным координатам

$$J_s^{(k)}[q(t)] = \int_0^T |\dot{q}_k(t)| dt; \quad (8)$$

- максимальной скоростью суставов

$$J_v^{(k)}[q(t)] = \max_t [\dot{q}_k(t)]. \quad (9)$$

В этой статье не отдается предпочтение какому-либо одному критерию качества, а предлагается перенести окончательное решение на этап проектирования, когда оно может быть выбрано конструктором путем назначения приоритетов или построения глобального критерия (методом минимакса, взвешенной суммы или др.).

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 4×4 матрицу локаций инструмента L и шестимерный вектор координат сочленений 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 последовательностью узлов $\{p_i, n_i\}$; $i = 0 : n$, где $\|p_i - p_{i-1}\| = \Delta S$; $\forall i = 1 : n$, и ΔS – шаг дискретизации, который должен быть достаточно мал для обеспечения желаемой аппроксимации контура (существует также 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 $L[t, \gamma(t)]$ 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

$$\{p_i, n_i\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} L_{i1}, & L_{i2}, & \dots, & L_{im} \\ Q_{i1}, & Q_{i2}, & \dots, & Q_{im} \end{matrix} \right\}. \quad (11)$$

Следовательно, допустимое пространство поиска может быть представлено многослойным направленным графом (рис. 2) с вершинами $V = \{L_{ij}\}$ и ребрами $E = \{(L_{ij}, L_{kl}) \mid i = k - 1; \forall i, j, k, l\}$, 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

$$\Pi(\gamma_0, \dots, \gamma_n) = \langle L_{0j_1} \rightarrow L_{1j_2} \rightarrow \dots L_{nj_n} \rangle \quad (12)$$

с начальным состоянием $V_0 \in \{L_{0j}\}$ и конечным состоянием $V_n \in \{L_{nj}\}$, который минимизирует желаемый показатель качества.

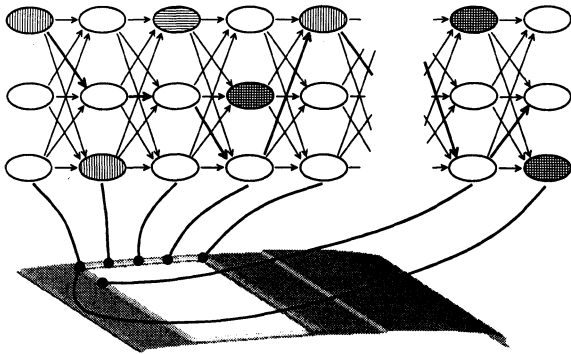


Рис. 2. Граф, описывающий пространство поиска

Синтез оптимальной траектории. Поскольку рассмотренные критерии качества отличаются своими свойствами (аддитивные, неаддитивные, и т. д.), для каждого из них требуется своя методика оптимизации. При этом для упрощения описания алгоритмов обобщенные координаты, соответствующие положению L_{ij} , будем обозначать как $q_k(i, j)$, а траектории, соответствующие вектору решения Γ , – как $q_k(i, j_{\gamma_i})$. Эти алгоритмы 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. Задача оптимизации

$$J_d^{(k)}(\Gamma) = \max_i |q_k(i, j_{\gamma_i}) - r_k| \rightarrow \min, \quad (13)$$

которая минимизирует отклонение k -й обобщенной координаты относительно заданного значения r_k , может быть решена 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 единствен. Однако, используя предложенный многокритериальный подход, обнаруженные «критические узлы»

$$(i_r, j_r) = \arg \left(\max_i \min_j |q_k(i, j) - r_k| \right), \quad (14)$$

которые соответствуют максимальному отклонению $q_k(i)$, могут быть преобразованы в ограничения, которые учитываются на следующих шагах, когда применяются другие критерии. В рамках предложенной формулировки такое преобразование выполнено простым сокращением множества Γ_i до одного элемента γ_{j_0} .

Минимизация диапазона изменения координат. Задача оптимизации

$$J_{\Delta}^{(k)}(\Gamma) = \max_i [q_k(i, j_{\gamma_i})] - \min_i [q_k(i, j_{\gamma_i})] \rightarrow \min, \quad (15)$$

которая минимизирует диапазон изменения k -й обобщенной координаты, может быть решена путем совместного использования предыдущего алгоритма и аппарата нелинейного программирования. Для этого введем вспомогательную целевую функцию, зависящую от параметра r_k :

$$f^{(k)}(r_k) = \max_i \left[\min_j |q_k(i, j) - r_k| \right] \rightarrow \min_{r_k}. \quad (16)$$

В этом случае значение r_k рассматривается как середина диапазона изменения обобщенной координаты, поэтому оптимальное решение r_k^0 дает два «критических узла»

$$\begin{aligned} & \{(i_r^+, j_r^+), (i_r^-, j_r^-)\} = \\ & = \arg \left(\min_{r_k} \max_i \min_j |q_k(i, j) - r_k| \right), \end{aligned} \quad (17)$$

которые соответствуют верхнему и нижнему уровням. Подобно предыдущему случаю оптимальное решение не единственно, так что критические узлы могут быть также преобразованы в ограничения 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

$$J_v^{(k)}(\Gamma) = \max_i |q_k(i, j_{\gamma_i}) - q_k(i-1, j_{\gamma_{i-1}})| \rightarrow \min_{\Gamma}, \quad (18)$$

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

$$\Gamma^0(p, \chi) = \langle \gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{p-1}, \chi \rangle, \quad (19)$$

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

$$\Gamma^0(p+1, \gamma) = \langle \gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{p-1}, \chi, \gamma \rangle \quad (20)$$

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

$$F_{p+1}(\gamma) = \min_{\chi \in \Gamma_p} \max \{F_p(\chi), |q_k(p+1, j_\gamma) - q_k(p, j_\chi)|\}. \quad (21)$$

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

$$J_s^{(k)}(\Gamma) = \sum_i |q_k(i, j_{\gamma_i}) - q_k(i-1, j_{\gamma_{i-1}})| \rightarrow \min_{\Gamma}. \quad (22)$$

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

$$F_{p+1}(\gamma) = \min_{\chi \in \Gamma_p} \{F_p(\chi) + |q_k(p+1, j_\gamma) - q_k(p, j_\chi)|\}. \quad (23)$$

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 для производства автомобилей ВАЗ (АО «АвтоВАЗ», Тольятти), грузовиков «Газель» (АО «ГАЗ», Нижний Новгород) и ЗИЛ (АМО «ЗИЛ», Москва). Данная САПР полностью совместима с программными продуктами фирмы Autodesk и включает ряд инструментальных средств, которые позволяют пользователю разработать компоновку роботизированного модуля и создать управляющую программу с учетом особенностей применяемой технологии.

Для проектирования РТК лазерной и плазменной резки в состав ROBOMAX входит подсистема Laser, в которой реализованы алгоритмы, предложенные в данной статье. Одно из последних применений ROBOMAX/Laser – автономное программирование РТК резки для АМО «ЗИЛ». Соответствующий роботизированный модуль включает робот KUKA PR161, а также необходимые механизмы фиксации и позиционирования и используется в мелкосерийном производстве, которое требует частое перепрограммирование. Как следует из опыта эксплуатации, разработанные методы и алгоритмы позволяют эффективно синтезировать и оптимизировать программы роботизированной резки трехмерных деталей сложной формы. Таким образом, полученные результаты были проверены при решении реальных производственных задач и позволили достичь существенного повышения экономической эффективности при мелкосерийном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Backes F., Geiger M., Franke V. Technology oriented Off-line programming for 3D Laser Processing // Technical Papers of the North American Manufacturing Research Institution / SME. – 1996. – С. 241–246.
2. Bauer L., Backes F. Offline-Programming of 3D Laser Systems // Preprints of the 4th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria Region, Pörschach. – 1995. – Vol. I. – С. 47–50.
3. Chen W., Zhang O., Yang Z., Gruver W. A. Optimizing Multiple Performance Criteria in Redundant Manipulators by Subtask-Priority Control: Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. – Vancouver, Canada, 1995. – С. 2534–2539.
4. Yoshikawa T. Manipulability of Robotic Mechanisms // Journal of Robotics Research. – 1985. – 4, № 2. – С. 3–9.