

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНСТРУМЕНТА АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

Чумаков О.А., Снисаренко С.В.

БГУИР, г. Минск, Беларусь, e-mail kafsu@bsuir.by

Введение

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 не избыточным манипуляционным системам. В данной работе предлагаются алгоритмы автономного программирования для роботов с шестью степенями подвижности, которые применительно к технологическим операциям 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 локация режущего инструмента L могут быть определены с точностью до вращения вокруг вектора \mathbf{n} [1]

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

$$t \in [0, T]; \gamma \in (-\pi, \pi] \quad (1)$$

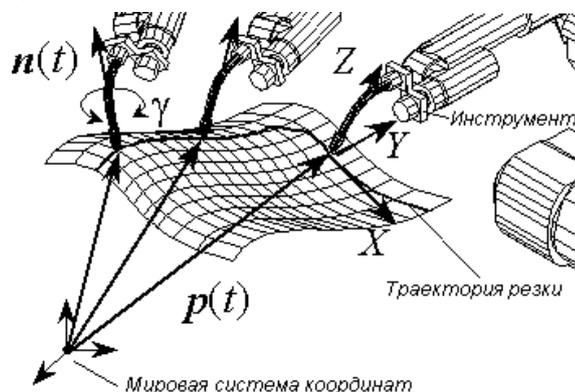


Рисунок 1 – Фреймы ориентации инструмента

В результате уравнение для локации инструмента 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 $\Psi_k(L)$ и $\Psi_c(L)$, ненулевые значения которых соответствуют нарушению заданного ограничения. Кроме того, для обеспечения плавного движения манипулятора, обходящего сингулярные конфигурации, введем еще одну бинарную функцию $\Psi_s(L)$, учитывающую нулевое значение допустимое расстояние до особой точки. Последнее может быть выражено как, например, нижняя грань мобильности [2].

Таким образом, рассматриваемая проблема планирования траектории робота может быть сформулирована следующим образом. - :Для заданной манипуляционной задачи, описанной параметризованной однородной матрицей-функцией $L(t, \gamma)$, $t \in [0; T]$, найти скалярную функцию $\gamma(t) \in (-\pi; \pi]$, которая определяет непрерывную траекторию допустимых локаций инструмента $L(t, \gamma(t))$ и минимизирует или максимизирует заданный критерий качества

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

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

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

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*).[3]

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 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 последовательности 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. 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 $\gamma \in \{-\pi : 2\pi/m : \pi\}$. [4]

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

$$\{p_i, n_i\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} L_{i1}, & L_{i2}, & \dots & L_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{i1}, & Q_{i2}, & \dots & Q_{im} \end{matrix} \right\}, \quad (4)$$

Следовательно, допустимое пространство поиска может быть представлено многослойным направленным графом (рис. 2) с вершинами $V = \{L_{ij}\}$ 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. [5]

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

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

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

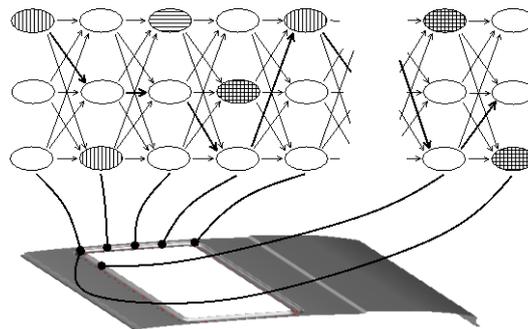


Рисунок 2 – Граф, представляющий собой пространство поиска

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. [6]

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} . [7]

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”

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

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. [8]

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

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

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

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

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашкевич А.П., Чумаков О.А. Планирование траектории для робототехнологического комплекса лазерной резки // Вестник БНТУ. – Минск, 2002. – №5. – С. 58-62.
2. Чумаков О.А. Автоматизация процессов резки материалов на базе промышленных роботов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. Восьмой Международной научно-технической конф. – Москва, 2002. – С. 377-378.
3. Multiple criteria optimization: state of the art annotated bibliographic surveys / edited by Matthias Ehrgott, Xavier Gandibleux. – Boston: Kluwer Academic Publishers. – 2002. – 496 pp.
4. Myszka D. Machines and mechanisms: applied kinematic analysis. / 2nd edition. – Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2002. – 516 pp.
5. Computer-aided programming of robotic manufacturing cells for laser cutting applications / A. Pashkevich, A. Dolgui, O. Chumakov – Proc. of the 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA'2001. – Antibes Juan-Les-Pins, France, October 15-18, 2001. – P.603-612.
6. Laumond J.-P. Robot motion planning and control. – Springer, London, New York, 1998. – 343 pp.
7. Gupta K., Pobil A.P. Practical motion planning in robotics: current approaches and future directions. – Wiley, New York, 1998. – 356 pp.
8. Janusz T. Preplanning robotic weld cells with simulation. [Electronic resource]. – Welding, Canada, June 1997. – Mode of access: http://www.mhbizlink.com/Content/welding/1997/06-97/f05_features.html.