

УДК 681.5

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТА В РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ РЕЗКИ С МАНИПУЛЯТОРОМ ИЗДЕЛИЯ

А.П. ПАШКЕВИЧ, О.А. ЧУМАКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 15 июня 2004

Предложены методы, позволяющие автоматизировать процесс генерации управляющей программы для РТК резки трехмерных объектов сложной формы. При этом оптимально используется кинематическая избыточность РТК с шестистепенным роботом и двухстепенным позиционером. В результате генерируется плавная траектория движения инструмента манипулятора, которая может быть воспроизведена в реальном масштабе времени с заданной точностью.

Ключевые слова: робот, позиционер, off-line программирование, автоматизация проектирования.

Введение

Автоматизация современного производства связана с использованием промышленных роботов, которые выполняют большинство основных технологических операций: сварку, сборку, окраску, и др. В настоящее время программирование многих технологических операций осуществляется при помощи САПР робототехнических комплексов (РТК), которые позволяют создавать управляющую программу на основе графической модели, включающей робот-манипулятор инструмента, манипулятор изделия (позиционер), систему управления, элементы ограждения и транспортировки деталей [1]. Такой подход не требует полной остановки РТК и его исключения из производственного процесса. Однако существующие САПР РТК [2] ориентированы в основном на технологию сварки и неприменимы для автоматизации программирования процесса резки трехмерных объектов сложной формы. Для операции резки таких объектов достаточно пять степеней подвижности, хотя в настоящее время наибольшее распространение получили манипуляторы с шестью степенями подвижности, которые применительно к данной технологической операции обладают кинематической избыточностью (это обусловлено возможностью произвольного вращения инструмента вокруг режущего луча без влияния на качество процесса). Кроме того, дополнительную избыточность образуют и степени подвижности позиционера. Эта избыточность существенно усложняет программирование, однако ее можно использовать при разработке управляющих программ для оптимизации движений суставов в пространстве обобщенных координат. Поэтому в данной работе рассматривается проблема автоматизации программирования РТК резки для системы с шестистепенным манипулятором и двухстепенным позиционером.

Формирование множества допустимых локаций инструмента

В рассматриваемых РТК промышленный робот используется в качестве "манипулятора инструмента", т.е. для перемещения инструмента вдоль траектории, а позиционер — в качестве "манипулятора изделия", т.е. для изменения положения детали в пространстве. Предположим, что расположение системы координат робота "Base" и позиционера "Positioner" относительно глобальной системы "World" описывается 4×4-матрицами однородных преобразований ${}^0\mathbf{T}_{Base}$ и ${}^0\mathbf{T}_{Positioner}$ соответственно (рис. 1), а каждое звено робота и позиционера описываются матричными функциями $\mathbf{T}_i(q_i)$ и $\mathbf{T}_i(\varphi_j)$ от обобщенных координат звеньев q_i и φ_j . Тогда кинематическую модель рассматриваемого РТК можно описать матричным уравнением

$${}^0\mathbf{T}_{Tool}(q) \equiv {}^0\mathbf{T}_{Base} \mathbf{T}_1(q_1)\mathbf{T}_2(q_2)\dots\mathbf{T}_5(q_5)\mathbf{T}_6(q_6)\mathbf{T}_7(\varphi_1)\mathbf{T}_8(\varphi_2) {}^{Flange}\mathbf{T}_{Tool}, \quad (1)$$

где ${}^{Flange}\mathbf{T}_{Tool}$ — матрица, описывающая положение и ориентацию системы координат инструмента "Tool" по отношению к системе координат крепежного фланца "Flange".

Для формализации рассматриваемой задачи необходимо представить траекторию резки в виде совокупности координатных фреймов. При этом для каждого сегмента траектории примем следующие соглашения: ось X_i направлена вдоль траектории резки; ось Z_i указывает направление нормали к поверхности изделия; ось Y_i дополняет оси X_i, Z_i до правой тройки. Тогда соответствующий фрейм сегмента может быть описан матричным уравнением

$${}^0\mathbf{T}_{Segm_i} = {}^0\mathbf{T}_{Positioner} {}^{Positioner}\mathbf{T}_{Wpiece} \cdot {}^{Wpiece}\mathbf{T}_{Segm_i}, \quad (2)$$

где однородная матрица ${}^0\mathbf{T}_{Positioner}$ описывает расположение системы координат позиционера относительно мировой системы координат, а матрицы ${}^{Wpiece}\mathbf{T}_{Segm_i}$ и ${}^{Positioner}\mathbf{T}_{Wpiece}$ — расположение координатного фрейма i -го сегмента траектории относительно детали и фрейма детали относительно системы координат позиционера соответственно.

Траектория резки, используемая в современных САПР РТК, создается на основе каркасной или поверхностной модели изделия и представляется в виде набора узловых точек ω'_i [3], каждая из которых включает вектор \mathbf{p}_i (декартовы координаты рабочей точки инструмента) и единичный вектор ориентации инструмента \mathbf{n}_i , перпендикулярный к обрабатываемой поверхности. Для каждой узловой точки траектории ω'_i определим систему координат и обозначим как "Node $_i$ ". Начало координат этой системы разместим в точке \mathbf{p}'_i , ось X направим вдоль траектории резки, ось Z — в направлении режущего луча \mathbf{a}'_i , а ось Y — так, чтобы X, Y, Z образовывали правую тройку векторов. Соответствующую матрицу однородных преобразований обозначим ${}^0\mathbf{T}_{Segm_i}$. Тогда манипуляционную задачу робота можно представить как совмещение координатных осей фреймов ${}^0\mathbf{T}_{Segm_i}$ и фреймов ${}^0\mathbf{T}_{Tool}(\mathbf{q})$ таким образом, что ось X_{Tool} совпадала с осью Z_{Segm_i} , а взаимное расположение оставшихся осей определяется с точностью до произвольного скалярного параметра γ , описывающего поворот рассматриваемых фреймов вокруг оси резки:

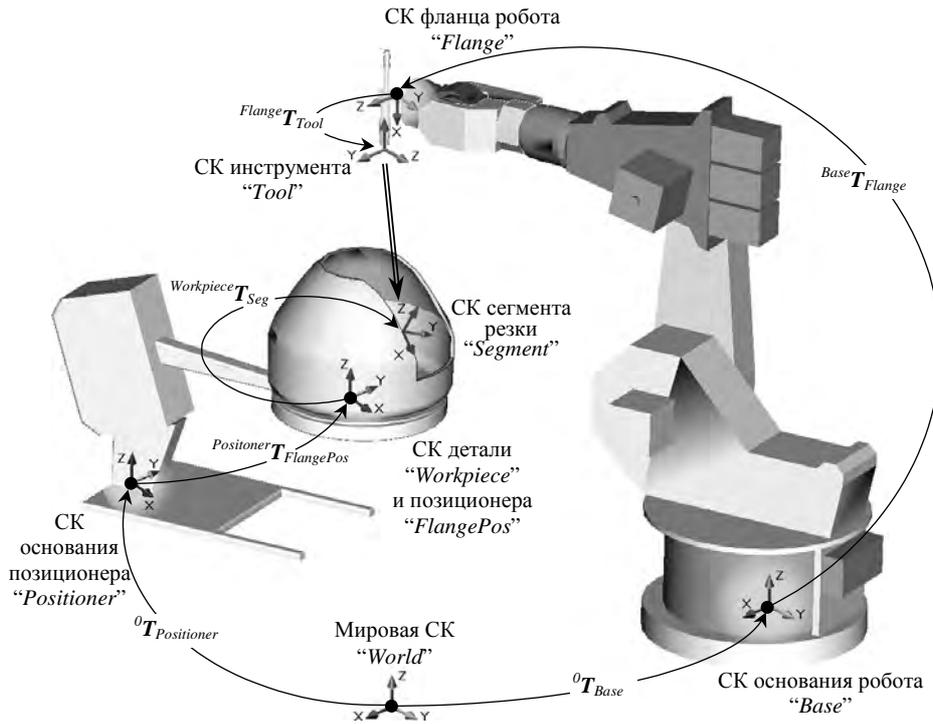


Рис. 1. Системы координат манипулятора инструмента (робота) и манипулятора изделия (позиционера)

$${}^0\mathbf{T}_{Seg_{\gamma}} \mathbf{R}_z(\gamma) = {}^0\mathbf{T}_{Tool}(\mathbf{q}) \mathbf{T}_{Positioner}(\varphi) \mathbf{H}, \quad (3)$$

где постоянная матрица $\mathbf{H} = \mathbf{R}_x(\pi) \mathbf{R}_y(\pi/2)$ учитывает порядок совмещения осей, а $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y, \mathbf{R}_z$ – операторы вращения вокруг X, Y, Z соответственно. В результате, применяя соответствующий алгоритм решения обратной задачи кинематики

$$\mathbf{Q}_i(\gamma, \varphi_1, \varphi_2) = \text{InvKin} \left[{}^0\mathbf{T}_{Seg_{\gamma}} \mathbf{T}_{Positioner}(\varphi_1, \varphi_2) \mathbf{R}_z(\gamma) \mathbf{H}^{-1} \right], \quad (4)$$

исходная совокупность сегментов траектории резки Ω' преобразуется в трехпараметрическое семейство обобщенных координат $\mathbf{Q}_i(\gamma, \varphi_1, \varphi_2)$. На практике целесообразно ограничиться дискретными значениями параметров $\gamma, \varphi_1, \varphi_2$ и множества $\{\mathbf{Q}_i(\gamma, \varphi_1, \varphi_2) : \gamma \in [0, \pi]; \varphi_1 \in [\varphi_{1min}, \varphi_{1max}]; \varphi_2 \in [\varphi_{2min}, \varphi_{2max}]\}$ описать многомерной матрицей, столбцы которой соответствуют одной и той же физической точке траектории резки, а элементами являются векторы обобщенных координат \mathbf{q} либо соответствующие им локации инструмента \mathbf{L} . При этом для каждого элемента этой матрицы необходимо проверить существование решения обратной задачи кинематики, близость к точкам сингулярности и отсутствие столкновений робота и режущего инструмента с другими элементами РТК. Применяя указанные операции ко всем узлам траектории резки Ω' , получаем, что множество допустимых локаций инструмента и соответствующих обобщенных координат представляется в виде "разряженной" четырехмерной матрицы $\{\mathbf{L}_{ijkl}, \mathbf{q}_{ijkl}\}$, каждый элемент которой представляет собой совокупность фрейма \mathbf{L}_{ijkl} , шестимерного вектора \mathbf{q}_{ijkl} и вектора ориентации изделия φ_{kl} .

Синтез оптимальной траектории движения инструмента

Набор матриц локаций описывается многослойным направленным графом с вершинами $V = \{\mathbf{L}_{ij}\}$ и ребрами $E = \{(\mathbf{L}_{ij}, \mathbf{L}_{kl}); i = k - 1; \forall i, j, k, l\}$ (рис. 2), где каждый слой соответствует определенному положению позиционера для заданного индекса конфигурации робота M . Тогда функция $\gamma(t)$ и две координаты позиционера изделия $\varphi_k(t), k = 1, 2$, определяют шесть тра-

екторий суставов робота $q_k(t)$, $k=1\dots6$, каждая из которых может быть оценена скалярным критерием $J_S^{(k)}(\cdot)$, который характеризует "объем движений" суставов, амплитуду приращений координат (или их взвешенную сумму) либо диапазон изменения координат.

В результате рассматриваемая задача планирования движения робота сводится к следующей оптимизационной задаче на графе: для заданных множеств вершин V и ребер E найти "наилучший" путь длины n $\Pi(\gamma_0, \dots, \gamma_n) = \langle \mathbf{L}_{0j_1} \rightarrow \mathbf{L}_{1j_2} \rightarrow \dots \mathbf{L}_{nj_n} \rangle$ с начальным состоянием $V_0 \in \{\mathbf{L}_{0j}\}$ и конечным состоянием $V_n \in \{\mathbf{L}_{nj}\}$, который обеспечивает Парето-оптимальность векторного критерия качества (5). Для упрощения описания алгоритмов обобщенные координаты, соответствующие положению суставов робота и позиционера \mathbf{L}_{ijkl} , обозначим как $q_k(i, j, k, l)$, а траектории, соответствующие вектору решения Γ , — как $q_k(i, j_i, k_i, l_i)$. Таким образом, используя эти обозначения, исходная задача формулируется в терминах теории комбинаторной оптимизации как поиск "наилучшего" пути, который минимизирует желаемый показатель качества.

Для минимизации объема движения для каждой обобщенной координаты

$$J_s^{(k)}(\Gamma) = \sum_i |q_k(i, j_i, k_i, l_i) - q_k(i-1, j_{i-1}, k_{i-1}, l_{i-1})| \rightarrow \min_{\Gamma}$$

применим метод динамического программирования. Предположим, что для всех конечных точек, принадлежащих множеству допустимых значений $\mathcal{Q}_p(\gamma, \varphi_1, \varphi_2)$, получены оптимальные решения для всех траекторий длины p . Тогда оптимальные решения $F(\cdot)$ для траекторий длины $p+1$ (с конечными точками $\mathcal{Q}_{p+1}(\gamma, \varphi_1, \varphi_2)$) могут быть получены на основе следующей рекуррентной процедуры:

$$F_{p+1}(\gamma, \varphi_1, \varphi_2) = \min_{\chi, \theta_1, \theta_2} \{F_p(\chi, \theta_1, \theta_2) + |q_k(p+1, \gamma, \varphi_1, \varphi_2) - q_k(p, \chi, \theta_1, \theta_2)|\}.$$

Таким образом, начиная с $p=1$ и последовательно увеличивая длину последовательности $\Gamma(p, \gamma, \varphi)$, для каждого конечного состояния могут быть найдены и оптимальный путь, и соответствующее значение показателя качества. Как в предыдущем случае, на последнем шаге происходит выбор лучшего конечного состояния из последовательности $\gamma, \varphi \in \Gamma_n$. Подобная рекурсия также дает оптимальное решение для взвешенной суммы и "наихудшего" компонента соответственного векторного показателя качества.

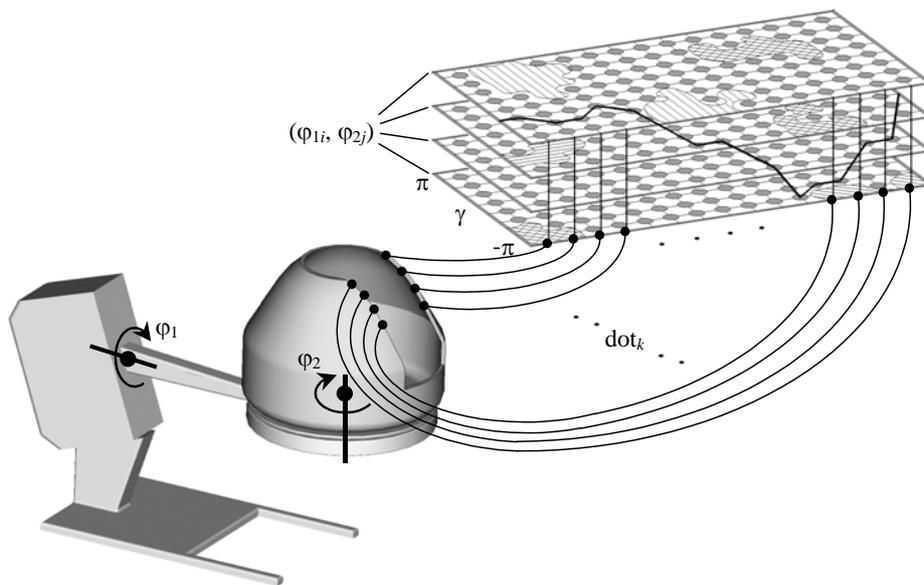


Рис. 2. Графовая модель пространства поиска (□ — отсутствие решений обратной задачи кинематики; ▒ — нарушение теста столкновений; ● — приближение к точкам сингулярности)

Таким образом, задача синтеза траектории резки сводится к нахождению некоторой оптимальной кривой в четырехмерном пространстве с запретными областями и линейными граничными условиями. Для рассматриваемой задачи, требующей только пять степеней свободы, избыточный параметр γ и две степени подвижности позиционера используются для сглаживания траектории в пространстве обобщенных координат, чтобы избежать резких поворотов режущего инструмента.

Рассматриваемые технические требования невозможно полностью описать с помощью скалярной целевой функции, хотя в идеальном случае все рассмотренные выше критерии качества должны стремиться к нулю, на практике минимизация одной компоненты критерия может увеличить значение другой. Поэтому разработчик должен выбрать одну из методик, которые обычно используются в векторной оптимизации. 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.

Заключение

Разработанные методы позволяют автоматизировать процесс генерации управляющей программы для РТК резки трехмерных объектов сложной формы. Предложенные алгоритмы реализованы в подсистеме Laser САПР ROBOMAX и были использованы при решении реальных производственных задач по автономному программированию РТК резки. Как следует из опыта эксплуатации, они позволяют эффективно синтезировать и оптимизировать программы роботизированной резки трехмерных деталей сложной формы и достичь существенного повышения экономической эффективности при мелкосерийном производстве.

OPTIMAL CONTROL OF INSTRUMENT MOVEMENT IN ROBOT-TECHNICAL CUTTING SYSTEM WITH ARTICLE MANIPULATOR

A.P. PASHKEVICH, O.A. CHUMAKOV

Abstract

Means for generation process automation of resident programme for robot-technical three-dimensional complex shape objects cutting system are proposed. At that kinematic redundancy of robot-technical system with sixdegree robot and bidegree positioner is optimally used. As a result smooth mechanical trajectory of manipulator instrument which can be reproduced in real time with prescribed accuracy is generated.

Литература

1. *Geiger M., Otto A.* Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, Tagungsband des 3. Erlanger Seminars LEF 2000. Bamberg: Meisenbach, 2000.
2. *Пашкевич А.П.* // Справочник. Инженерный журнал. 1997. № 5. С. 27–33