



## ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЛАЙНОВОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ В СИСТЕМАХ ЧПУ ПРИ ОБРАБОТКЕ СКУЛЬПТУРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Г.М. Мартинов, В.Л. Сосонкин (МГТУ "СТАНКИН")

Представлены анализ основных типов сплайнов, используемых в системах ЧПУ, и обзор их достоинств. Приведены примеры программирования сплайнов в управляющей программе ЧПУ и пример построения постпроцессора. Рассмотрена процедура построения сплайн-контура из отрезков прямых в процессе обработки изделия. Исследована область применения сплайновой интерполяции в производстве.

### Введение

Потребность в обработке поверхностей свободной формы (скульптурных поверхностей) непрерывно возрастает. Сегодня эта потребность поддержана как эволюцией собственных функций систем ЧПУ (увеличение вычислительной мощности, появление новых типов интерполяции, внедрение алгоритмов оптимизации обработки), так и возрастанием возможностей аппаратного и информационного окружения ЧПУ (развитие контрольно-измерительной техники для оцифровки сложных поверхностей, широкое внедрение весьма совершенных CAD-CAM систем). Основными потребителями являются автомобильная, аэрокосмическая, судостроительная промышленность, а также область производства бытовой техники. Представительными изделиями можно посчитать турбинные лопатки, лопасти вентиляторов и гребных винтов, штампы и пресс-формы; причем все эти изделия обрабатываются на станках с ЧПУ. Базовыми элементами траектории при обработке подобных изделий являются сплайны.

Основной проблемой для системы ЧПУ является выбор типа сплайна и способа его представления в управляющей программе, а также математическое обеспечение реализации сплайновой траектории. Дальнейшее рассмотрение посвящено этой проблеме. Цель авторов состояла во внедрении сплайновой интерполяции в систему ЧПУ WinPCNC, которая является оригинальной разработкой научно-исследовательской лаборатории ЧПУ (<http://www.ncsystems.ru>).

### Представление о сплайне

Сплайн является методом аппроксимированного описания сложной криволинейной траектории. Применение компьютеров в проектных работах позволило исследовать физические свойства сплайнов и смоделировать их математически. Понятие "сплайн" пришло в обиход из высшей математики, а получило распространение среди машиностроителей по мере внедрения проектирование высокоуровневых CAD-систем. Например, построение сложных твердотельных моделей невозможно представить без использования сплайнов. Достоинство сплайнов состоит в их "гладком" характере

(т.е. в непрерывной производной уравнения контура) и в отсутствии ограничений на сложность пространственной траектории. Стоит отметить и хорошо отработанный математический аппарат описания сплайнов.

Пусть отрезок  $[a, b]$  задан разбиением (сеткой) с точками  $x: a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ . Пусть также в точках известны значения  $y_0, y_1, \dots, y_{n-1}, y_n$  некоторой функции. Задача интерполяции состоит в нахождении сплайна  $S(x_i) = y_i$ , где  $i = 0, 1, n-1, n$ . Поставленная таким образом задача имеет множество решений, которые могут быть сведены к единственному путем дополнительных ограничений.

### Сложная интерполяция в системах ЧПУ

Большинство систем ЧПУ располагают лишь линейной, круговой и винтовой интерполяцией. Для обработки сложных скульптурных поверхностей строят линейную аппроксимацию с помощью САМ-системы, которая представляет траекторию в виде коротких отрезков длиной до 20 мкм. Современные системы ЧПУ решают ту же задачу посредством полиномов и сплайнов. Из всего их многообразия устойчивое применение в системах управления нашли всего несколько их видов. Рассмотрим особенности применения этих методов интерполяции.

- Полиномиальная интерполяция считается наиболее простой. Ее применяют для гладких траекторий особенно в тех случаях, когда на основе малого числа заданных точек необходимо получить точный результат. Контур представляют в виде полинома степени  $n-1$ , где  $n$  — число точек с известными значениями интерполируемой функции. Недосток состоит в больших затратах вычислительной мощности и в сравнительно высокой погрешности в случае негладких контуров.

- Сплайн-интерполяция использует кусочно-кубические функции. Этот метод обладает большими достоинствами; но его применяют, когда число заданных точек достаточно велико.

- "Рациональная" сплайн-интерполяция представляет собой функцию отношения двух полиномов. Этот метод можно считать наиболее мощным, поскольку он располагает дополнительными параметрами для управления формой контура.

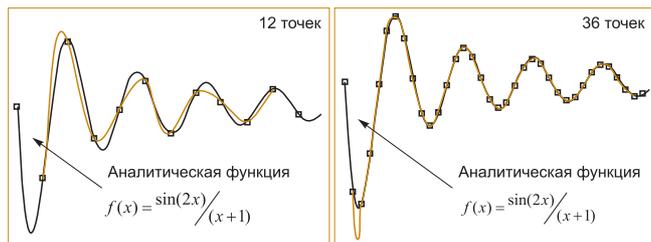


Рис. 1. Точность ASPLINE-сплайна в зависимости от числа заданных точек

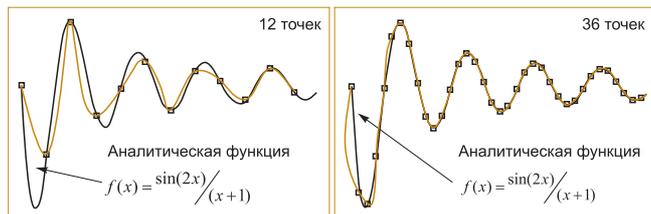


Рис. 2. CSPLINE (кубический сплайн)

Задача сплайновой интерполяции состоит из двух подзадач: расчет коэффициентов сплайна и расчет значений функции сплайна в отдельных его точках. Расчет коэффициентов сплайна обычно выполняет САМ-система, а расчет значений функции сплайна осуществляют в рамках алгоритма интерполяции системы ЧПУ.

Далее более подробно рассмотрены три варианта сплайнов: ASPLINE, NURBS и CSPLINE.

**Сплайн типа ASPLINE**

Сплайн ASPLINE (Akima spline) проходит точно через все заданные точки [1]. В обобщенном виде ASPLINE-сплайн может быть представлен многочленом:

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D. \tag{1}$$

При неравномерной сетке точек коэффициенты  $A, B, C$  и  $D$  находят решением системы четырех линейных уравнений (2):

$$\begin{cases} y_i = Ax_i^3 + Bx_i^2 + Cx_i + D; \\ y_{i+1} = Ax_{i+1}^3 + Bx_{i+1}^2 + Cx_{i+1} + D; \\ 3Ax_i^2 + 2Bx_i + C = \frac{1}{d_{i-1} + d_i} \left( \frac{(y_i - y_{i-1})d_i}{d_{i-1}} + \frac{(y_{i+1} - y_i)d_{i-1}}{d_i} \right); \\ 3Ax_{i+1}^2 + 2Bx_{i+1} + C = \frac{1}{d_i + d_{i+1}} \left( \frac{(y_{i+1} - y_i)d_{i+1}}{d_i} + \frac{(y_{i+2} - y_{i+1})d_i}{d_{i+1}} \right), \end{cases} \tag{2}$$

где  $d_{i-1} = x_i - x_{i-1}$ ,  $d_i = x_{i+1} - x_i$  и  $d_{i+1} = x_{i+2} - x_{i+1}$ .

Максимально возможное число заданных точек зависит от вычислительных возможностей системы ЧПУ; например, система Sinumerik фирмы Siemens позволяет строить сплайны, проходящие через шесть точек. При использовании ASPLINE-сплайна следует учитывать, что резкое изменение кривизны не позволяет построить непрерывную кривую с хорошей степенью аппроксимации.

Этот тип сплайна целесообразно использовать в тех случаях, когда координаты заданных точек полу-

чены в результате измерения на контрольно-измерительной машине. Точность сплайна зависит от числа заданных точек (рис. 1).

**CSPLINE-сплайны**

Кубический (Cubic) сплайн CSPLINE представляет собой непрерывную кривую, проходящую через заданные точки, которые расположены вдоль аналитически вычисляемой кривой (рис. 2). Точки равномерной сетки аналитической функции

$$f(x) = \frac{\sin(2x)}{x+1}$$

одновременно служат основой для построения кубического сплайна.

Интерполяцию кубическими сплайнами определяют как быстрый, эффективный и устойчивый от погрешностей способ интерполяции контура, который успешно конкурирует с полиномиальной интерполяцией. В основе построения кубического сплайна лежит идея разбиения интерполируемого контура на небольшие интервалы, для каждого из которых задают свой полином третьей степени. Коэффициенты полинома подбираются так, что на границах интервалов сохраняется непрерывность самой функции, а также ее первой и второй производных. Существует возможность задавать граничные условия в виде значений первой или второй производной на границах интервалов. При известном значении одной из производных на границах интервала получаем воспроизводимую интерполяционную схему. Если значения производных неизвестны, то вторую производную на границе интервала полагают равной нулю; при этом получают достаточно хорошие результаты.

Только для Akima-сплайна и кубического сплайна можно задавать дополнительные параметры, влияющие на характер прохождения сплайна через его первую и последнюю точки.

Интерполяционный кубический сплайн класса  $C^2$  имеет на отрезке существования непрерывную производную второго порядка. Его описывают многочленом

$$S(f, x) = \sum_{k=0}^3 a_k^{(i)} (x - x_i)^k. \tag{3}$$

Сплайн  $S(f, x)$  на каждом из отрезков  $[x_i, x_{i+1}]$  определяется четырьмя коэффициентами  $a_0^{(i)}, a_1^{(i)}, a_2^{(i)}$  и  $a_3^{(i)}$ , поэтому для его построения необходимо определить  $4n$  коэффициентов, где  $n$  – число точек сетки. На практике используют способ, при котором число величин, подлежащих определению, сводят к  $n + 1$ . Для этого интерполяционный сплайн на каждом из отрезков  $[x_i, x_{i+1}]$  представляют в следующем виде:

$$S_i(x) = y_i(1 - t)^2(1 + 2t) + y_{i+1}t^2(3 - 2t) + m_i h_i t(1 - t)^2 - m_{i+1} t(1 - t), \tag{4}$$

где  $h_i = x_{i+1} - x_i$  и  $t = \frac{x - x_i}{h_i}$ .

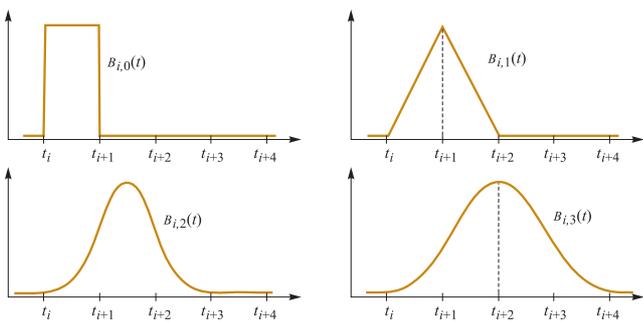


Рис. 3. Базисные функции с первого до третьего порядка

Решением системы (5) из  $n+1$  линейных уравнений определяют  $n+1$  неизвестных  $m_i$ , где  $i = 0, \dots, n$ .

$$\begin{cases} 2m_0 + \mu_0 m_1 = c_0, \\ \lambda_i m_{i-1} + 2m_i + \mu_i m_{i+1} = c_i, \quad i = 1, \dots, n-1, \\ \lambda_n m_{n-1} + 2m_n = c_n, \end{cases} \quad (5)$$

где 
$$c_i = 3 \left( \mu_{i-1} \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} + \lambda_i \frac{f_i - f_{i-1}}{h_{i-1}} \right),$$

$$\mu_i = h_{i-1}(h_{i-1} + h_i)^{-1}, \lambda_i = 1 - \mu_i, h_i = x_{i+1} - x_i,$$

$$\mu_0 = \lambda_n = 0, c_0 = 2f'_0 \text{ и } c_n = 2f'_n$$

Для решения такой системы используют "метод прогонки", являющийся модификацией метода Гаусса и исключающий накопление ошибок округления результатов [2].

### NURBS-сплайны

Полное наименование NURBS-сплайнов (Non-Uniform Rational B-spline) – это неравномерные рациональные B-сплайны. Свойство Non-Uniform (неравномерность, неоднородность) означает различную степень влияния управляющей точки на форму кривой, что особенно важно при моделировании сложных кривых. Свойство Rational (рациональность) означает, что математическое выражение, описывающее интерполируемую кривую, есть отношение двух полиномов. Свойство позволяет точнее моделировать различные кривые.

Понятие B-spline (базисный сплайн) говорит о способе построения интерполяционной кривой между тремя и более управляющими точками.

Математически NURBS-сплайн описывают следующим образом [3]:

$$\underline{Q}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,p}(t) P_i w_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,p}(t) w_i}, \quad (6)$$

где  $B_{i,p}$  – нормализованная базисная функция (basis function), которая определяет зависимость формы кривой от конкретной управляющей точки  $P_i$  (см. рис. 3);  $P_i$  – управляющая точка (control point); расположение множества управляющих точек определяет форму NURBS-кривой;  $w_i$  – вес управляющей точки, который определяет "силу притяжения" управляющей точки к кривой;  $p$  – порядок базисных функций в

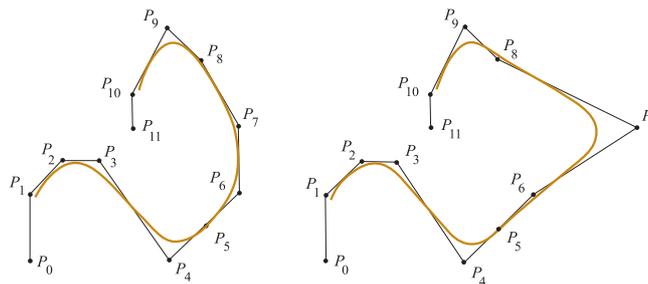


Рис. 4. Влияние положения управляющих точек на формирование NURBS-сплайна

числителе и знаменателе рационального многочлена, определяющего NURBS;  $t_i$  – узел (knot); вектор узлов (knot vector) определяет зоны (интервалы) влияния управляющих точек по длине кривой.

Базисные функции вычисляют рекурсивно, начиная с  $B_{i,0}$ :

$$B_{i,0}(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_i \leq t < t_{i+1}, \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

$$B_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k} - t_i} B_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k+1} - t}{t_{i+k+1} - t_{i+1}} B_{i+1,k-1}(t), \text{ где } 1 \leq k \leq p.$$

Если  $k$  – самый высокий порядок базисной функции кривой NURBS, то говорят, что она имеет порядок  $k$ , или что она имеет  $(k-1)$  степень полинома, или имеет  $(k-2)$  непрерывную производную. В системах ЧПУ работают с кривыми NURBS третьего или четвертого порядка.

Широкое применение NURBS в машиностроении связано с возможностью осуществлять тонкую настройку (подгонку) NURBS-кривой к траектории любой сложности. В отличие от других сплайнов NURBS обладает тремя независимыми типами параметров, определяющими форму сплайн-кривой: управляющими точками, весами и узлами. Рассмотрим физическое представление каждого из этих типов параметров и особенности их применения в системах ЧПУ.

Форма NURBS-сплайна определена положением управляющих точек  $P_i$  на рис. 4. Если соединить управляющие точки прямыми линиями, то они образуют управляющий многоугольник (control polygon), который удобен для сопоставления с результирующим сплайном.

Правая кривая на рис. 4 иллюстрирует влияние смещения управляющей точки  $P_7$ . Форма кривой изменяется не по всей длине кривой, а только в окружении управляющей точки. Этот эффект называют локальным управлением, которое позволяет вносить в CAD-CAM-системы локальные коррекции путем перемещения отдельных управляющих точек, не затрагивая формы кривой в целом.

Рациональные кривые, в отличие от обычных B-сплайнов, обладают следующими практически важными свойствами:

- они обеспечивают корректный результат при проекционных трансформациях таких, как масштабирование;

• их можно использовать для моделирования произвольных кривых, включая конические сечения (окружности, эллипсы, параболы и гиперболы).

Эти свойства поддерживаются путем введения дополнительного параметра – веса ( $w$ ) управляющей точки. По умолчанию, вес каждой управляющей точки равен 1,0, что означает одинаковое влияние всех точек на форму кривой. Увеличение веса отдельной управляющей точки придает ей возможность усиления влияния, что создает эффект "притяжения" кривой к этой точке (рис. 5).

Следует иметь в виду, что изменение весов только отдельных управляющих точек оказывает влияние на форму кривой. При пропорциональном изменении веса всех управляющих точек форма кривой сохранится.

Каждая контрольная точка имеет собственную базисную функцию. Кривая NURBS с пятью управляющими точками, представленная на рис. 6а, будет обладать пятью такими функциями, каждая из которых покрывает некоторый интервал кривой. Все базисные функции на рис. 6а имеют абсолютно одинаковую форму и охватывают равные интервалы влияния. Точки, разграничивающие интервалы, называются узлами, а упорядоченный их список – вектором узлов. Вектор узла для базисных функций, показанных на рис. 7а, имеет вид  $\{0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0\}$ . Это пример равномерного (uniform) вектора узлов, когда все базис-

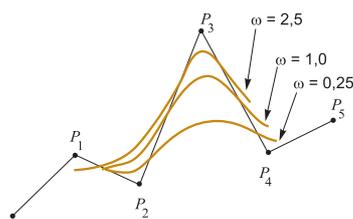


Рис. 5. Влияние веса управляющей точки на "притяжение" кривой

ные функции на рисунке охватывают равные интервалы по длине кривой.

Заменив вектор узлов на  $\{0,0; 1,0; 2,0; 3,75; 4,0; 4,25; 6,0; 7,0\}$ , получим набор неравномерных базисных функций, показанных на рис. 6 б, и соответствующую кривую (с использованием того же набора управляющих точек). Базисные функции  $B_{2,3}(t)$  и  $B_{3,3}(t)$ , связанные с управляющими точками  $P_2$  и  $P_3$  соответственно, выше остальных, а интервалы  $\{3,75; 4,0\}$  и  $\{4,0; 4,25\}$  в векторе узлов для этих двух контрольных точек уже остальных, что оказывает концентрирующее влияние на кривую. В результате кривая сильнее смещена к управляющим точкам  $P_2$  и  $P_3$ .

Важными свойствами неравномерных векторов узлов являются: возможность управлять точным размещением начальной и конечной точек сплайна; возможность задавать кривую, содержащую петли или изломы.

Пусть, например, вектор узлов  $\{0,0; 0,0; 0,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0\}$  определяет набор базисных функций таким образом, что начало кривой совпадает с управляющей точкой  $P_0$  (рис. 7 а).

При смещении нескольких узлов в середину вектора  $\{0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 3,0; 5,0; 6,0; 7,0\}$  получим кривую (7 б), имеющую излом в управляющей точке  $P_2$ . Совпадение двух узлов понижает степень кривизны в этом соединении на единицу; если совпадают три узла, то степень кривизны понижается на два, и так далее.

Запрограммированные (оцифрованные) точки исходного контура создают некоторое множество управляющих точек NURBS-сплайна. Построенный сплайн лишь "тяготеет" к управляющим точкам, не пересекая их, кроме начальной и конечной точек, через которые проходит касательная к сплайну. Дополнительные параметры (веса), задаваемые в кадре управляющей программы ЧПУ, оказывают влияние на форму сплайна. Они могут быть привязаны к каждой управляющей точке контура. Так, в программе системы ЧПУ Sinumerik вес  $w$  управляющей точки можно изменять в диапазоне 0...3 с шагом 0,0001.

**Сплайн-программирование в системах ЧПУ**

Еще недавно применение сплайновой интерполяции в системах ЧПУ выглядело достаточно экзотично, ее использовали немногие наиболее продвинутые системы. Сегодня сплайновую интерполяцию предлагают большинство систем ЧПУ из известных на рынке (таблица).

К сожалению, широкое распространение сплайновой интерполяции не привело к унификации форматов данных. В отсутствии стандарта ввода данных каждая фирма-производитель сама решает, расширять ли набор G-кодов или использовать для задания сплайна команды собственного макроязыка.

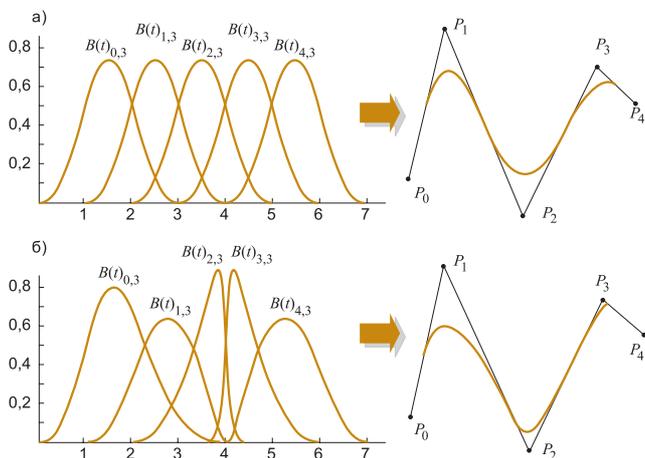


Рис. 6. Базовые функции для множества контрольных точек и NURBS-кривая для векторов узлов:

- а) равномерное распределение в векторе узлов;
- б) неравномерное распределение в векторе узлов

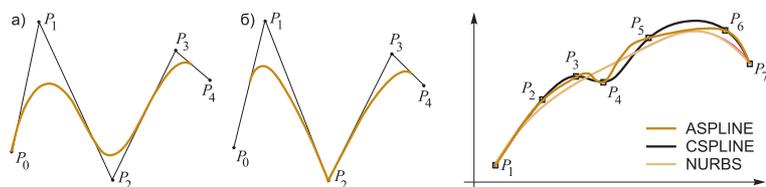


Рис. 7. Влияние вектора узлов на форму кривой

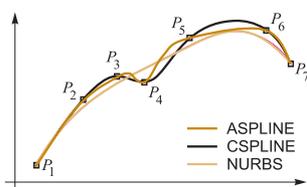


Рис. 8. Использование параметрических сплайнов при интерполяции

Таблица. Применение сплайнов в системах ЧПУ

№	Системы ЧПУ	Тип сплайновой интерполяции	Максимальное число осей, ед.	Способ задания
1	ACD CNC-System	CSPLINE, B-Spline, ASPLINE	-	
2	Allen Bradley	CSPLINE		
3	Andronic 2060	ASPLINE	16	G30, язык Anlog C
4	Delta Tau ADV810Q, PMAC	CSPLINE, NURBS		G1.1
5	D.Electron CNC Z32.NET	NURBS	3	-
6	Fagor 8070CNC	CSPLINE, ASPLINE, полином		
7	FANUC 18i	NURBS		G06.2
8	HEIDENHAIN iTNC 530	CSPLINE	5	SPL
9	MachineMate CNC, PA 8000	CSPLINE	5	G005, G006, M070, M071, M072, M073
10	Mitsubishi	NURBS		-
11	NUM 1080 CNC	CSPLINE, NURBS, полином	9	
12	Okuma	SuperNURBS		-
13	Siemens Sinumerik 840D	NURBS, CSPLINE, ASPLINE, полином	8	
14	TwinCAT CNC	BSPLINE, CSPLINE		-
15	WinPCNC v.3	CSPLINE	3	

Отметим, что в интерполяционных алгоритмах систем ЧПУ используют параметрическое представление сплайнов [4], а это снимает ограничение на размерность пространства и позволяет применять алгоритм для замкнутых контуров. В качестве параметра используют текущую длину контура, вычисляемую как сумму длин хорд, соединяющих заданные точки. Применение параметрических сплайнов ASPLINE, CSPLINE и NURBS для построения интерполируемой кривой проиллюстрировано на рис. 8.

**Достоинства сплайновой интерполяции**

Проблема в том, сохраняет ли система ЧПУ высокую точность и качество, и как отразится использование сплайновой интерполяции на общем времени обработки.

Исследования фирм-производителей систем ЧПУ, в частности, фирмы GE Fanuc, показывают, что один типичный NURBS-сплайн может заменить 5...10 кадров с линейной интерполяцией [5]. Уменьшение числа кадров снижает риск приостановки интерполяции из-за "истощения" очереди подготовленных кадров.

Повышение производительности при использовании NURBS-сплайнов можно объяснить сокращением объема файла управляющей программы и повышением равномерности подачи за счет сокращения разгонов и торможений.

При линейной аппроксимации траектории скачкообразное изменение подачи отдельных координатных приводов приводит к ухудшению динамики пе-

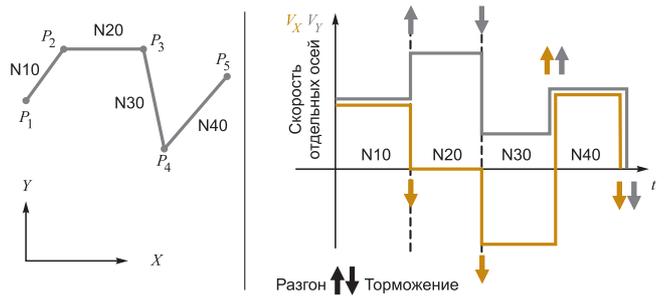


Рис. 9. Характер движения при линейной аппроксимации контура

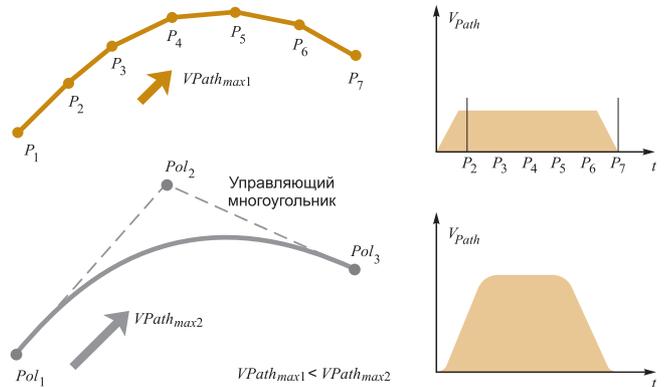


Рис. 10. Повышение производительности при сплайновой интерполяции

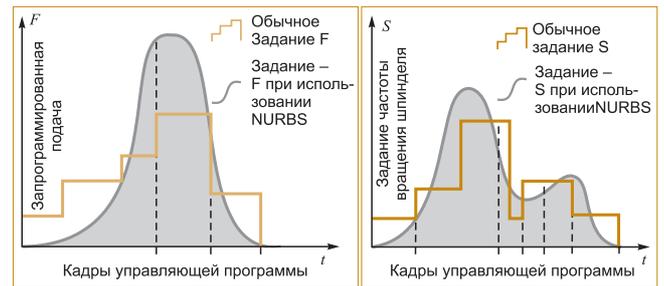


Рис. 11. Постоянные условия резания: а) при использовании NURBS и смене подачи; б) при смене оборотов и использовании NURBS

ремещений исполнительных органов станка (рис. 9). За этим следует дополнительный механический износ узлов, инструмента; а также и ухудшение качества обработанной поверхности изделия.

Гладкость обрабатываемого контура при сплайн-интерполяции позволяет повысить контурную скорость без потери качества обработки. Более высокая контурная скорость и сокращенная траектория движения уменьшают время обработки и увеличивают общую производительность (рис. 10). Контурная скорость при сплайн-интерполяции  $V_{Pathmax2}$  на 20...50% больше, чем контурная скорость при линейной аппроксимации  $V_{Pathmax1}$ .

Изменение величины подачи и оборотов шпинделя при линейной аппроксимации отрицательно сказывается на качестве обработки, поскольку для каждого кадра возможно только ступенчатое изменение подачи и оборотов шпинделя (рис. 11).

Здесь преимущества сплайновой технологии выглядят наиболее очевидно.

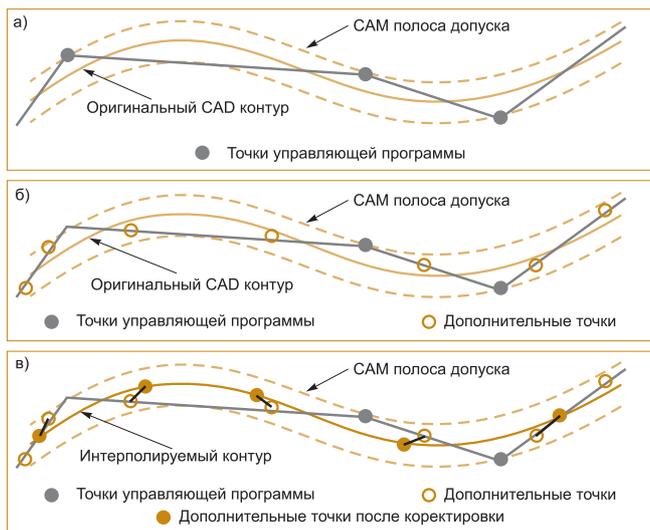


Рис. 12. Принцип нано-сглаживания

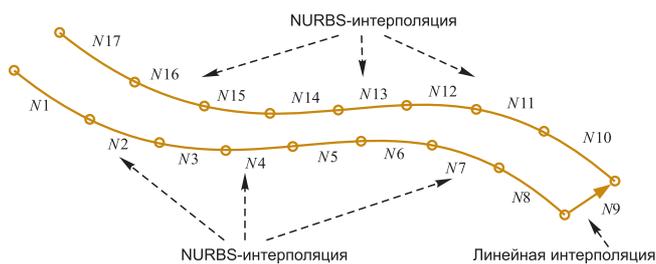


Рис. 13. Пример нано-сглаживания контура системы FANUC

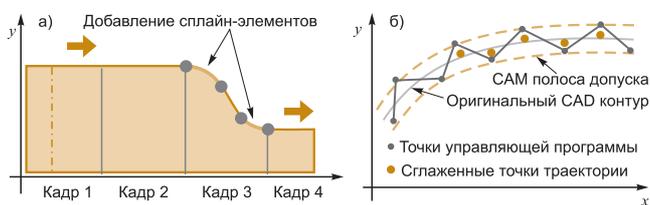


Рис. 14. Комбинация решения look-ahead smooth с "компрессором COMPCAD":

- а) автоматическое добавление сглаживающих сплайн-элементов с помощью G642;
- б) сглаживание ошибки геометрии (траектории) посредством COMPCAD

**Сглаживание линейного контура**

Создание NURBS-управляющих программ требует соответствующего ПО. Это сложный ресурсоемкий процесс, требующий верификации управляющих программ, предполагающий несколько итераций. Многие современные САМ-системы до сих пор генерируют для скульптурных поверхностей лишь линейные кадры.

На многих предприятиях накопилось множество отлаженных и сертифицированных управляющих программ, в которых реализована линейная аппроксимация скульптурных поверхностей. Для подобных программ фирма Fanuc предлагает использовать технологию нано-сглаживания (nano smoothing) [6].

САМ-системы аппроксимируют криволинейные траектории линейными кадрами, используя при этом

допуск на точность обработки. Ужесточение допуска влечет за собой рост числа кадров, что существенно перегружает вычислительный процесс системы ЧПУ. Уменьшить общее число кадров можно, располагая большинство генерируемых САМ-системой точек на границах допуска (рис. 12а).

В соответствии с технологией наносглаживания генерируется NURBS-сплайн по линейным кадрам управляющей программы ЧПУ. Специальный алгоритм вставляет в контур управляющей программы дополнительные точки, которые ближе к исходной кривой, чем точки управляющей программы (рис. 12б). Дополнительные точки используются для новой аппроксимации линейными сегментами исходного NURBS-сплайна. Положение добавленных точек может быть скорректировано окончательно таким образом, чтобы все они определяли непрерывный NURBS-сплайн (рис. 12в). Наносглаживание осуществляется с точностью до 0,000001 мм.

Программировать наносглаживание в управляющей программе несложно. Алгоритм активизируется в кадре с функцией G05.1 Q2 с перечислением задействованных в интерполяции осей (X/Y/Z/A/B) и нулевыми значениями функций перемещения. Далее автоматически включается высокоскоростная обработка контура с контролем скорости и ускорения для предотвращения динамических ударов в механических узлах системы. Деактивация выполняется в кадре с функцией G05.1 Q0.

Пример результирующего контура по алгоритму наносглаживания показан на рис. 13. Отметим, что если кадр N09 не принадлежит NURBS контуру, алгоритм автоматически распознает подобные ситуации и сохраняет линейную интерполяцию. Простота команд наносглаживания позволяет легко интегрировать их в постпроцессоры и обрабатывать в системе ЧПУ.

Siemens реализует подобную же технологию, комбинируя функцию опережающего просмотра look-ahead smooth с функцией обратной генерации NURBS-контура COMPCAD ("компрессором") в процессе обработки изделия. Предварительный просмотр кадров по команде G642 позволяет автоматически добавлять сплайн-элементы для сглаживания переходов между кадрами (рис. 14а). Программная функция-компрессор COMPCAD преобразует линейные кадры с интерполяцией G1 в отрезки сплайнов (рис. 14б).

По данным фирм-производителей металлообрабатывающего оборудования [5, 7] применение технологии NURBS позволяет получить преимущества по сравнению с аппроксимацией линейными участками при обработке сложных моделей.

**Заключение**

1. Интерполяция NURBS-сплайнами является хорошей альтернативой традиционной аппроксимации хордами при обработке поверхностей свобод-

ной формы штампов и пресс-форм, в особенности с высокой скоростью подачи без потери точности. При обработке простых геометрических поверхностей эффективность применения NURBS-сплайнов снижается. Следовательно, NURBS-сплайны не смогут полностью вытеснить линейную и круговую интерполяцию.

2. Технология NURBS-сплайнов может предложить более эффективный способ достижения точности, чем традиционная аппроксимация хордами.

3. NURBS-сплайны называют "жесткими", поскольку интерполяция не вызывает высокочастотных колебаний, характерных для случаев применения CSPLINE-сплайнов. В отличие от ASPLINE-сплайнов, NURBS-сплайны не строят петлю в точках резкого изменения кривизны.

### Список литературы

1. Hiroshi Akima. A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points", ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 4, No. 2, June 1978.
2. Завялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1980.
3. Schneider P.J. NURB Curves: A Guide for the Uninitiated developer// The Apple Technical Journal. N25, March 1996.
4. Beard Tom. Interpolating Curves. MMS Online. <http://www.mmsonline.com/articles/109704.html>
5. Zelinski Peter. Understanding NURBS Interpolation. MMS Online. <http://www.mmsonline.com/articles/079901.html>
6. Brownhill Mark. An alternative view: nano smoothing NURBS curves for best fit // Tooling & Production. 3/1/2005; [http://www.manufacturingcenter.com/tooling/archives/0305/0305alternative\\_view.asp](http://www.manufacturingcenter.com/tooling/archives/0305/0305alternative_view.asp)
7. Что такое сплайн? (NURBS, ASPLINE, BSPLINE). <http://automation-drives.ru/mc/archive/press/index.php>

*Мартинев Георгий Мартинев — д-р техн. наук, доцент,  
Сосонкин Владимир Лазаревич — д-р техн. наук,  
профессор Московского государственного технологического университета "СТАНКИН".  
Контактный телефон (499) 972-94-40. E-mail: book@ncsystems.ru <http://www.ncsystems.ru>*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЧПУ

А.М. Дильман (ООО "Сименс")

*Представлены основные функциональные модули информационной системы для ЧПУ (MCIS – Motion Control Information System), разработанной и используемой в области машиностроения компанией Сименс.*

Не секрет, что имеющиеся на современном рынке металлообрабатывающие станки и обрабатывающие центры отечественных и зарубежных OEM-поставщиков оборудования обладают высокой производительностью, практически неисчерпаемыми возможностями в отношении программ технологической обработки. Это поощряется и существенным прогрессом развития аппаратных средств, который создает предпосылки решения качественно новых задач на программном уровне. Однако зачастую внедрение современной техники и закупка нового оборудования происходит без каких-либо организационных подвижек и последующей оценки эффективности вложения средств. Современные станки и другое промышленное оборудование используются взамен устаревшей техники необученным обслуживающим персоналом по неизменным принципам, невзирая на заложенный потенциал для роста производительности и повышения качества продукции. Таким образом, для предприятия выгода от применения новых высокопроизводительных технологий может нивелироваться, а

их внедрение и эксплуатация может не только не привести к ожидаемым результатам в повышении эффективности производства и качества выпускаемой продукции, но и вызвать ряд проблем, являться причиной дополнительных расходов.

Многолетняя успешная практика фирмы Сименс в области машиностроения показывает, что изменение принципов организации производства за счет применения современных промышленных технологий несет большой потенциал для увеличения производительности. С этой целью на ряде промышленных предприятий используется информационная система для ЧПУ MCIS, в состав которой входят несколько уникальных программных модулей.

### Управление производственными данными (MDA, Machine Data Acquisition)

Модуль сбора и анализа данных производства повышает прозрачность работы технологического оборудования, дает статистику для анализа (как в графичес-



Рис. 1. Анализ причин нарушений на предприятии



Рис. 2. Интерфейс пользователя для передачи технологических программ