

Сплайн-контуры в системе ЧПУ

Проиллюстрированы сплайны, используемые в системах ЧПУ, приведены примеры их применения и показана специфика программирования сплайн-контуров в управляющих программах систем ЧПУ. Рассмотрены перспективные решения по сглаживанию траектории и компрессии управляющих программ с помощью NURBS-сплайнов в системах ЧПУ.

Сплайн является методом аппроксимированного описания сложной криволинейной траектории. Применение компьютеров в проектных работах позволило исследовать физические свойства сплайнов и смоделировать их математически. Понятие «сплайн» получило распространение среди машиностроителей по мере внедрения в проектирование высокоуровневых CAD-систем. 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 $i=0, 1, \dots, n-1, n$. Поставленная таким образом задача имеет множество решений, которые путем введения дополнительных ограничений сводятся к единственному.

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 собой 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 [1]. Рассмотрим особенности применения этих методов интерполяции.

• Полиномиальная интерполяция считается наиболее простой. Ее применяют для гладких траекторий, особенно в тех случаях, когда на основе

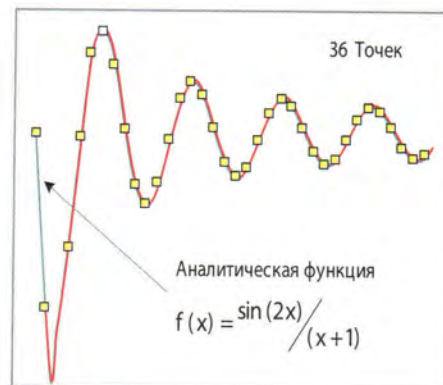
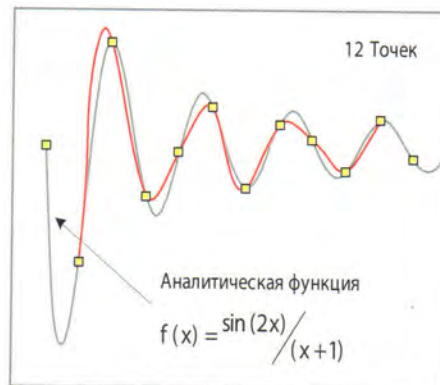


Рис. 1. ASPLINE с равномерно распределенными точками

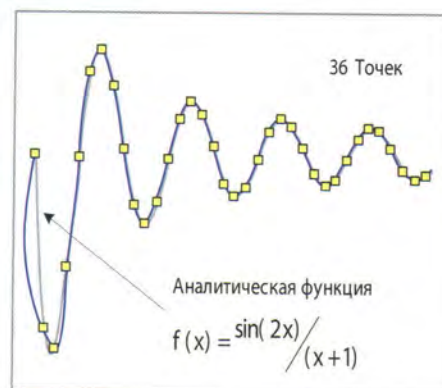
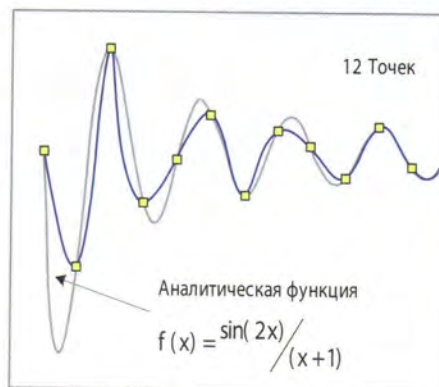


Рис. 2. CSPLINE (кубический сплайн)

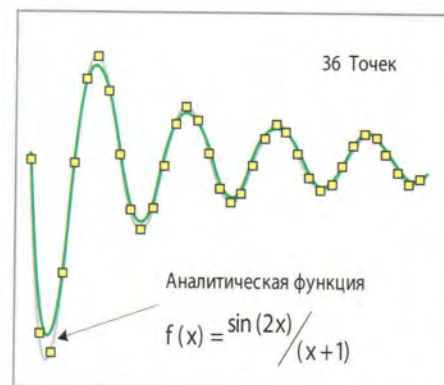
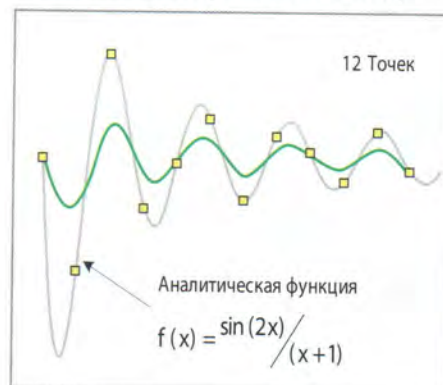


Рис. 3. NURBS

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. Недостаток состоит в необходимости большой 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.

• Akima сплайн-интерполяция требует меньших затрат вычислительной мощности, поскольку для вычисления одного участка достаточно четыре точки.

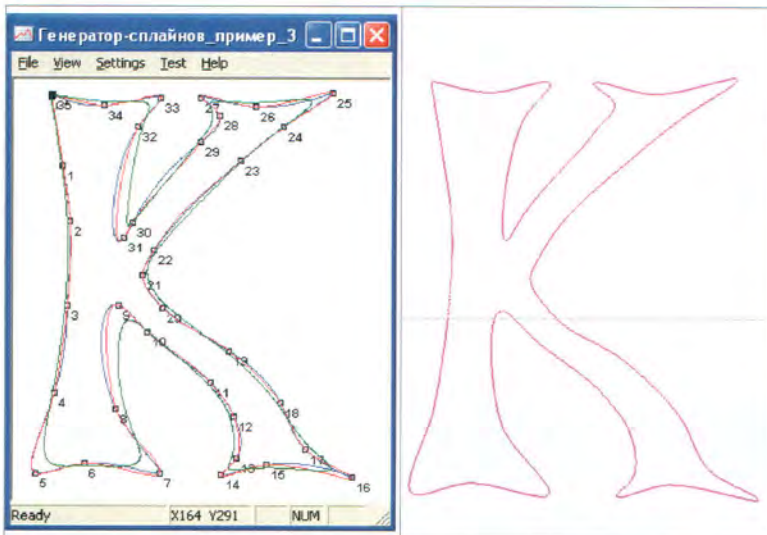


Рис. 4. Гравирование логотипа

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

Сплайн-контур

Аkima-сплайн (ASPLINE) [2] используют, когда координаты заданных точек получены в оцифровке на контрольно-измерительной машине. Точность сплайна зависит от числа заданных точек (рис. 1).

Интерполяцию кубическими сплайнами определяют как быстрый, эффективный и устойчивый к погрешностям способ интерполяции контура, который успешно конкурирует с полиномиальной интерполяцией [3].

NURBS-сплайны (Non-Uniform Rational B-spline) – это неравномерные рациональные B-сплайны. Свойство Non-Uniform (неравномерность, неоднородность) означает различную степень влияния управляющей точки (заданной точки контура) на форму кривой, что особенно важно при моделировании сложных кривых. Свойство Rational (рациональность) означает, что математическое выражение, описывающее интерполируемую кривую, есть отношение двух полиномов, что позволяет точнее моделировать различные кривые [4].

Генерация и редактирование сплайн-контуров на плоскости

Утилита Spline Generator [5] позволяет технологу-программисту загружать файл с оцифрованными координатами

нат точек или самому расставлять и корректировать точки на плоскости, добавлять и удалять точки, менять их порядок, выбирать и просматривать тип сплайн интерполяции, менять параметры NURBS-сплайнов – вес управляющей точки и вектор узлов [6].

Одно из применений сплайн-контуров – создание шрифтов и логотипов. На рис. 4а представлен логотип, где красным, синим и зеленым цветами показаны, соответственно, Akima, кубический и NURBS сплайн-контур.

Результат интерполяции Akima-сплайна того же контура в системе ЧПУ WinPCNC представлен на рис. 4б.

Сплайн-программирование в системах ЧПУ. Еще недавно применение сплайновой интерполяции в системах ЧПУ выглядело достаточно

экзотично, она использовалась лишь в немногих наиболее продвинутых системах. Сегодня сплайновой интерполяцией обладает большинство известных на рынке систем ЧПУ (см. табл.).

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

Рассмотрим сплайновую интерполяцию на примере системы WinPCNC (рис. 5). Управляющая программа в коде ISO-7bit задает координаты

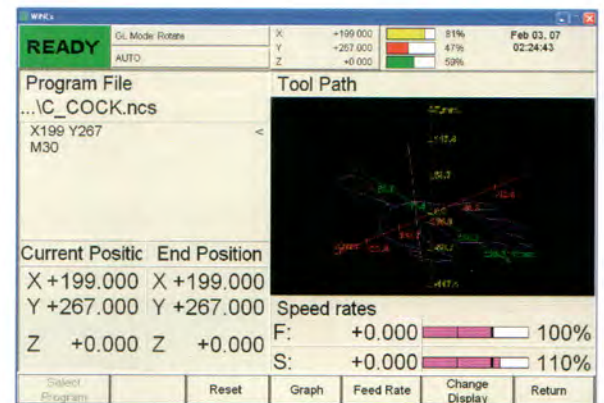


Рис. 5. Результаты обработки оцифрованного контура по алгоритмам сплайновой интерполяции WinPCNCa

Применение сплайнов в системах ЧПУ

№	Системы ЧПУ	Тип сплайновой интерполяции	Макс. кол-во осей	Способ задания
1.	ACD CNC-System	CSPLINE, B-Spline, ASPLINE	—	—
2.	Allen Bradley CNC 9/Series	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	G06, G48, G49, G104
12.	Okuma	SuperNURBS		—
13.	Siemens Sinumerik 840D	NURBS, CSPLINE, ASPLINE, полином	8	ASPLINE, SPLINE, BSPLINE, POLY
14.	TwinCAT CNC	BSPLINE, CSPLINE		—
15.	WinPCNC v. 3.5	NURBS, CSPLINE, ASPLINE	3	ASPLINE, SPLINE, BSPLINE, G07, G08, G30

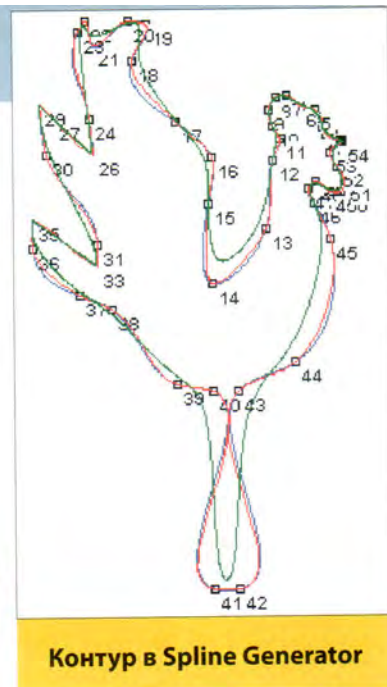
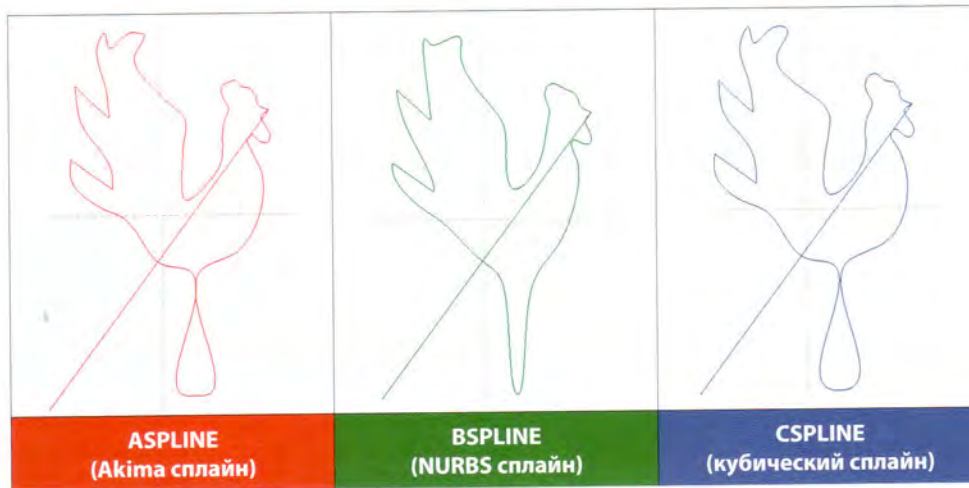


Рис. 6. Оцифрованный контур и построение сплайнов с помощью утилиты Spline Generator

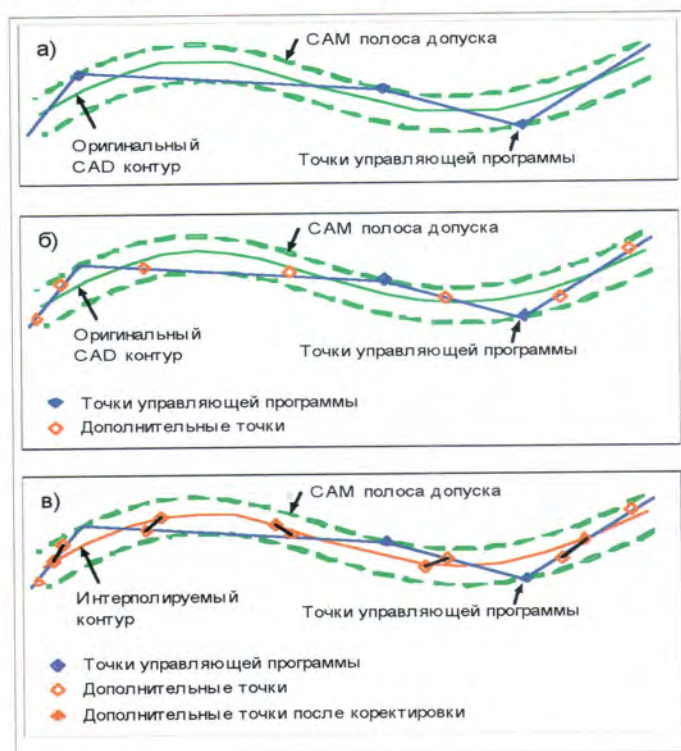


Рис. 7. Принцип нано-сглаживания

оцифрованных точек и тип сплайновой интерполяции: Akima (ASPLINE), NURBS (BSPLINE) или кубический сплайн (CSPLINE). Формат кадра управляющей программы, задающего сплайновую интерполяцию, полностью совместим с синтаксисом систем SINUMERIK фирмы Siemens.

Специфика обработки контура разными типами сплайновой интерполяции системы ЧПУ и его оцифровка в утилите Spline Generator представлены на рис. 6.

Сглаживание линейного контура. Создание NURBS-управляющих программ требует соответствующего программного обеспечения. Это сложный ресурсоемкий процесс, требующий

верификации управляющих программ, предполагающий несколько итераций. Многие современные CAM-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) [7].

CAM-системы аппроксимируют криволинейные траектории линейными кадрами, используя при этом допуск на точность обработки. Ужесточение допуска влечет за собой увеличение числа кадров, что существенно перегружает вычислительный процесс системы ЧПУ. Уменьшить общее число кадров можно, располагая большинство генерируемых CAM-системой точек на границах допуска. Это продемонстрировано на рис. 7 (а).

В соответствии с технологией нано-сглаживания 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. 7, б). 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. 7, в). Нано-сглаживание осуществляется с точностью до 0,000001 мм.

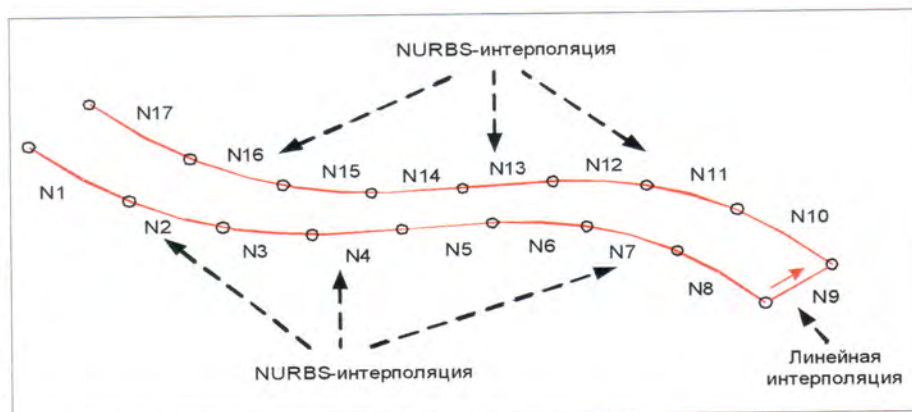


Рис. 8. Пример нано-сглаживания контура в системе FANUC

Программировать нано-сглаживание в управляющей программе не сложно. 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.

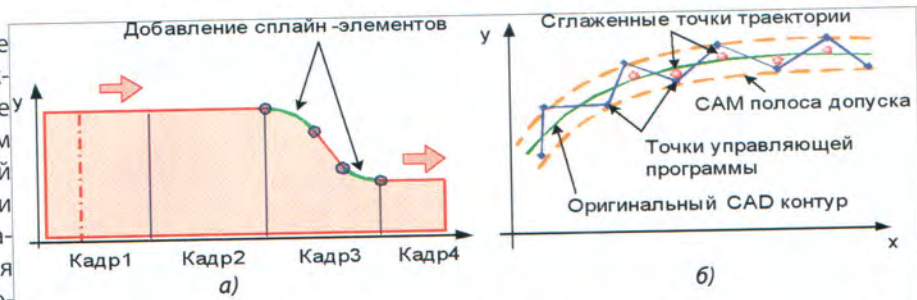


Рис. 9. Комбинация решения look-ahead smooth с «компрессором COMPCAD»: а) автоматическое добавление сглаживающих сплайн-элементов с помощью G642; б) сглаживание ошибки геометрии (траектории) посредством COMPCAD

G05 P10000;

G91;

G05.1 Q2 X0 Y0 Z0;

N1 G01 X1000 Z-300;
N2 X1000 Z-200;

N8 X1000 Z-350;
N9 Y1000;
N10 X-1000 Z350;

N17 X-1000 Z300;

G05.1 Q0;

G05 P0;

Результирующий контур для приведенного фрагмента управляющей программы показан на рис. 8. Отметим, что если кадр N09 не принадлежит NURBS-контур, алгоритм автоматически распознает подобные ситуации и сохраняет линейную интерполяцию. Простота команд нано-сглаживания 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. 9, а). Программная функция-компрессор COMPCAD преобразует линейные кадры с интерполяцией G01 в отрезки сплайнов (рис. 9, б).

G00 X30 Y6 Z40

G1 F10000 G642

SOFT

; Soft smoothed path acceleration

COMPCAD

; Compressor interface optimization ON

STOPFIFO

; Stop high-speed processing section

N24050 Z32.499

N24051 X41.365 Z32.500

N24056 X44.076 Z32.300

COMPOF

; Compressor OFF

G00 Z50

M30

По данным фирм-производителей металлообрабатывающего оборудования [5] применение технологии NURBS

позволяет получить серьезные преимущества по сравнению с аппроксимацией линейными участками при обработке сложных моделей.

Заключение. Интерполяция NURBS-сплайнами является хорошей альтернативой традиционной аппроксимации хордами при обработке поверхностей свободной формы, например, 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.

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

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.

Технология сглаживания траектории и компрессии управляющих программ с помощью NURBS-сплайнов в системах ЧПУ позволяет повысить качество обрабатываемого изделия, используя старые управляющие программы.

Мартинова Л. И., к.т.н., доц.
Мартин Г. М., д.т.н., проф.
martinov@ncsystems.ru

Список литературы:

1. Мартинов Г. М., Сосонкин В. Л. Проблемы использования сплайновой интерполяции в системах ЧПУ при обработке скульптурных поверхностей // Автоматизация в промышленности. 2006. № 11. с. 3–9.
2. 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.
3. Заявлов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1980.
4. ScheiderP.J. NURB Curves: A Guide for the Uninitiated develops// The Apple Technical Journal. No. 25, March 1996.
5. <http://www.ncsystems.ru/>
6. Zelinski Peter. Understanding NURBS Interpolation. MMS Online. <http://www.mmsonline.com/articles/079901.html>
7. 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