

УДК 629.735.33.002: 621.9.06-529: 004.421

В.Ф. СОРОКИН, В.В. КОМБАРОВ, И.А. ТЕРНЮК*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

МЕТОД ПРЯМОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КОНТУРНОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ СПЛАЙНОВОГО ИНТЕРПОЛЯТОРА СИСТЕМЫ ЧПУ

Рассмотрена задача обеспечения интерполятором системы ЧПУ высокой стабильности контурной скорости движения инструмента при обработке сложнофасонных поверхностей. Решение этой задачи сводится к высокоточному вычислению в режиме реального времени дугового расстояния, проходимого инструментом по криволинейной траектории за один такт управления. Показаны точностные преимущества прямого метода стабилизации контурной скорости. Предложено модель криволинейной траектории строить в классе сплайн-функций пятой степени методом оптимального отображения в пространство В-сплайнов, отличающегося высокой вычисляемостью. Разработан алгоритм прямого метода стабилизации контурной скорости. Результаты эксперимента, подтвердили возможность вычисления прямым методом дугового расстояния криволинейной траектории с заданной точностью за время существенно меньшее одного такта управления.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, система ЧПУ, сплайновая интерполяция, скорость, стабилизация.

Введение

Одной из проблем высокоскоростной ЧПУ обработки, является обеспечение плавности изменения кинематических параметров движения рабочих органов оборудования [1 – 3].

В работе [2] проведен анализ источников возникновения кинематических погрешностей формообразования и показано, что плавное изменение значений скорости, ускорения и рывка в процессе высокоскоростной обработки приводит к значительному повышению точности позиционирования рабочих органов оборудования.

Одним из факторов, влияющих на плавность изменения указанных кинематических параметров движения, является формирование траектории обработки гладкими функциями класса не ниже C^4 (например, полиномиальными сплайнами пятой степени) [4 – 6].

Второй фактор – использование для описания контурной скорости движения на участках разгона-торможения S-образных гладких функций класса C^3 (например, гармонических тригонометрических функций), обеспечивающих гладкость функций ускорения и рывка [2].

Однако планирование контурной скорости и гладких траекторий перемещения инструмента является лишь необходимым, но недостаточным условием обеспечения плавности изменения кинематических параметров движения рабочих органов. Важно также в интерполяторе системы ЧПУ точно

вычислять длину дуги каждого сегмента траектории обработки, проходимую инструментом за время одного такта управления.

Некорректная и неточная оценка дуговой длины будет приводить к нежелательным колебаниям контурной скорости и, как следствие, к скачкам в графиках осевых скоростей, ускорений и рывков [7].

Эти скачки при увеличении скоростей обработки могут превысить технические возможности оборудования и существенно увеличить погрешность позиционирования его рабочих органов.

Сложность задачи связана с необходимостью осуществлять вычисления в режиме реального времени.

В работах [8] и [9] приведены алгоритмы решения задачи вычисления дуговой длины одного сегмента криволинейной траектории, обеспечивающие точность расчета контурной скорости обработки в диапазоне (+1,0%; – 3,0%) и (+0,09%; – 0,11%) соответственно.

Эти результаты не обеспечивают необходимого уровня точности и требуют улучшения.

Поэтому **целью данной работы** является анализ перспективных стратегий решения задачи стабилизации контурной скорости для сплайнового интерполятора системы ЧПУ и разработка метода прямого вычисления дуговой длины криволинейной траектории обработки в режиме реального времени с заданной точностью.

1. Постановка задачи стабилизации контурной скорости

В процессе управления система ЧПУ выполняет интерполяцию заданной траектории движения инструмента. При интерполяции криволинейной траектории для каждого такта управления рассчитываются координаты точки, лежащей на заданной кривой и отстоящей от предыдущей точки позиционирования на расстояние, равное шагу интерполяции. Величина шага интерполяции численно равна тактовой скорости, то есть перемещению, совершаемому за один такт управления.

Пусть заданы:

τ – время одного такта СЧПУ (сек);

F – контурная скорость обработки (мм/сек).

Тогда заданная величина шага интерполяции на каждом цикле управления определится по формуле

$$H = F \cdot \tau.$$

Математическую модель траектории движения представим в виде параметрического уравнения кривой. Векторное представление уравнения в p -мерном Римановом пространстве, где $p \geq 2$ – количество координат обработки, имеет вид:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u), \quad u \in [u_0, u_n], \quad (1)$$

где u_0 – значение параметра в начальной точке кривой;

u_n – значение параметра в конечной точке кривой.

Параметрическое уравнение траектории для трехкоординатной обработки с программируемыми осями X, Y, Z – имеет вид:

$$X = x(u), \quad Y = y(u), \quad Z = z(u). \quad (2)$$

а длина траектории на интервале $u \in [u_1, u_2]$ определяется по формуле

$$S(u_1, u_2) = \int_{u_1}^{u_2} \sqrt{x'(u)^2 + y'(u)^2 + z'(u)^2} du. \quad (3)$$

Решая относительно u_2 при заданном u_1 уравнение

$$S(u_1, u_2) = H \quad (4)$$

найдем точку $\mathbf{r}(u_2)$, отстоящую по дуге кривой от точки $\mathbf{r}(u_1)$ на величину шага интерполяции (рис. 1).

Это решение, как отмечалось ранее, должно быть как можно более точным. Точность расчета шага интерполяции на каждом цикле управления принято оценивать в процентах по формуле

$$\delta_i = \frac{H_i - H}{H} \cdot 100\% \quad i = \overline{1..n}, \quad (5)$$

где H_i – фактический шаг интерполяции, полученный при решении уравнения (4), на i -м цикле управления.

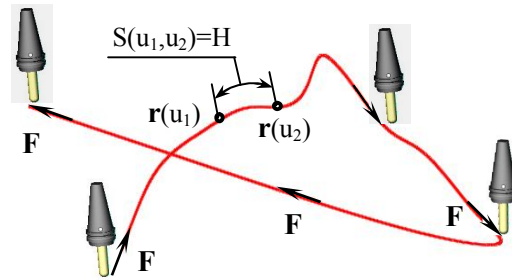


Рис. 1. Участок траектории движения инструмента

Тогда мерой стабильности контурной скорости, обеспечиваемой данным интерполятором системы ЧПУ, при движении по криволинейной траектории могут служить показатели

$$\delta_{\min} = \min_i(\delta_i);$$

$$\delta_{\max} = \max_i(\delta_i);$$

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\delta_i|.$$

Для программно-управляемого оборудования эксплуатируемого в настоящее время необходимо обеспечение стабильности задания контурной скорости не хуже 0,001%.

Это связано с необходимостью использования информации о дифференциальных кинематических характеристиках движения (ускорение и рывок), получаемой конечноразностным дифференцированием данных о скорости.

2. Анализ методов решения задачи стабилизации контурной скорости

Современные интерполяторы систем ЧПУ для высокоскоростной обработки являются двухуровневыми (рис. 2).

На верхнем уровне (ВУ) решаются задачи, не требующие режима реального времени, а задачи нижнего уровня (НУ) решаются в режиме реального времени.

Среди задач верхнего уровня необходимо выделить два блока. Блок «представление в виде сплайнов» обеспечивает формирование математической модели криволинейной траектории движения инструмента, а блок «планирование подачи» – формирование программы плавного изменения контурной скорости движения инструмента внутри кадра с учетом гладких законов разгона-торможения и ограничений оборудования. Кроме того существует блок

подготовительных расчетов, задачей которого является подготовка вспомогательных данных для снижения вычислительной нагрузки нижнего уровня.

Расчет шага интерполяции осуществляется на нижнем уровне. Поэтому время вычисления дуговой длины сегмента траектории в интерполяторе системы ЧПУ должно быть существенно меньше одного такта управления τ (например, $\tau = 0,001$ сек).

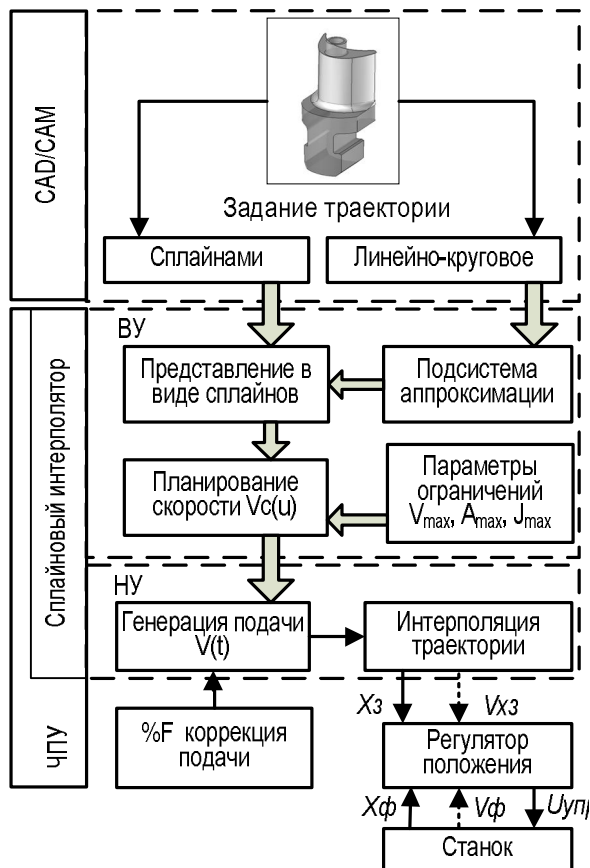


Рис. 2. Структурная схема системы ЧПУ со сплайновым интерполятором

По способу получения результата методы криволинейной (сплайновой) интерполяции криволинейных траекторий можно разделить на *прямые* и *непрямые*.

Прямым методом интерполяции будем называть метод, обеспечивающий вычисление дуговой длины траектории без использования полученных на верхнем уровне интерполятора вспомогательных функций.

Соответственно методы, использующие для расчета дуговой длины кроме уравнения траектории обработки еще и вспомогательные функции, будем называть *непрямыми методами интерполяции*.

К прямому относится итерационный метод решения уравнения (4), при котором целенаправленно изменяя на каждой итерации параметр u_2 и вычисляя

интеграл (3) находим значение u_2 , обеспечивающее выполнение условия

$$\frac{|S(u_1, u_2) - F \cdot \tau|}{F \cdot \tau} \cdot 100 < \varepsilon, \quad (6)$$

где ε – заданная допустимая погрешность.

При этом интеграл (3) вычисляется численно, например, по правилу Симпсона. Кроме погрешности ε , источником вычислительных погрешностей этого метода является погрешность численного интегрирования.

Перспективными непрямыми методами интерполяции, на наш взгляд, являются следующие два метода:

1. Метод, основанный на использовании *аналитически интегрируемой* аппроксимации функции

$$f(u) = \sqrt{x'(u)^2 + y'(u)^2 + z'(u)^2}. \quad (7)$$

2. Метод, основанный на использовании аппроксимации функции

$$u = \varphi \left(\int_{u_0}^a f(u) du \right) \quad a \in [u_0, u_n]. \quad (8)$$

В первом случае на верхнем уровне интерполятора производится предварительное вычисление подынтегральной функции $f(u_k)$ в некоторых опорных точках $u_k \in [u_0, u_n]$ с последующей аппроксимацией полученных пар чисел (u_k, f_k) вспомогательной *аналитически интегрируемой* функцией $\hat{f}(u)$, которая передается на нижний уровень интерполятора до начала ЧПУ обработки данного участка траектории. При этом на нижнем уровне в реальном времени осуществляется такой же, как в прямом методе итерационный процесс с аналитическим вычислением интеграла вспомогательной функции $\hat{f}(u)$. Кроме погрешности ε , источником вычислительных погрешностей этого метода является погрешность аппроксимации при создании вспомогательной функции $\hat{f}(u)$.

Во втором случае на верхнем уровне интерполятора осуществляется численное (например, по правилу Симпсона) вычисление интеграла

$$S(u_0, u_k) = \int_{u_0}^{u_k} f(u) du$$

в некоторых опорных точках $u_k \in [u_0, u_n]$ с последующей аппроксимацией полученных пар чисел (S_k, u_k) вспомогательной функции $u = \hat{\varphi}(S)$, параметры которой передаются на нижний уровень

интерполятора до начала ЧПУ обработки данного участка траектории.

При этом на нижнем уровне в реальном времени вычисляется только значение функции $u = \hat{\phi}(S)$, с последующим вычислением по формулам (2) координат точки $r(u)$. Источником вычислительных погрешностей данного метода является погрешность численного интегрирования и погрешность аппроксимации при создании вспомогательной функции $\hat{\phi}(S)$.

Следует заметить, что именно эта стратегия с построением вспомогательной функции (8) использовалась в работе [9], где был получен результат в диапазоне

$$\begin{aligned} \delta_{\min} &= -0,11\%; \\ \delta_{\max} &= 0,09\%. \end{aligned}$$

Анализ рассмотренных методов стабилизации контурной скорости позволяет сделать вывод, что в сплайновом интерполяторе системы ЧПУ предпочтительно использовать прямой метод, так как он является самым точным, и не требует создания и хранения в процессе обработки параметров вспомогательных функций (7) или (8).

В то же время прямой метод является самым медленным из рассмотренных с точки зрения вычислительного процесса.

Поэтому использование на практике непрямых методов интерполяции связано с тем, что используемые методы математического моделирования криволинейных траекторий обработки (например, NURBS) не позволяют решать уравнение (4) только на нижнем уровне интерполятора в режиме реального времени.

3. Вычисление дуговой длины траектории прямым методом

Для существенного сокращения времени вычислений, предлагается для представления гладких криволинейных траекторий перемещения инструмента использовать метод оптимального отображения в пространство В-сплайнов с линейной функцией отображения и базисными функциями пятой степени [2, 5, 10].

В этом случае сплайн-функция для моделирования криволинейных траекторий будет иметь вид

$$r(u) = \sum_{i=2}^{N+2} C_i \cdot B_5 \left(\frac{N \cdot (u-u_0)}{u_n-u_0} - i \right), \quad (9)$$

где N – размерность пространства В-сплайнов;

C_i – действительные коэффициенты;

$B_5(u)$ – экономичное представление базисного В-сплайна пятой степени, которое имеет вид

$$B_5(u) = \frac{1}{5!} \times \begin{cases} 66 + 10 \cdot (3 - |u|) \cdot u^4 - 60 \cdot u^2, & |u| < 1; \\ 26 - 20 \cdot (u_1^4 - u_1^2) + 5 \cdot (u_1^4 + 4 \cdot u_1^2 - 10) \cdot u_1, & 1 \leq |u| < 2; \\ (3 - |u|)^5, & 2 \leq |u| < 3; \\ 0, & |u| \geq 3; \end{cases}$$

$$u_1 = |u| - 1.$$

Продифференцировав выражение (9), получим выражения для вычисления производных

$$r'(u) = \frac{N}{u_n - u_0} \cdot \sum_{i=2}^{N+2} C_i \cdot B'_5 \left(\frac{N \cdot (u-u_0)}{u_n-u_0} - i \right) \quad (10)$$

$$B'_5(u) = \text{sign}(u) \cdot \frac{1}{4!} \times \begin{cases} -10 \cdot u^4 + 24 \cdot (u^2 - 1) \cdot |u|, & |u| < 1; \\ -10 - 16 \cdot (u_1^2 - 0,5) \cdot u_1 + (5 \cdot u_1^2 + 12) \cdot u_1^2, & 1 \leq |u| < 2; \\ -(3 - |u|)^4, & 2 \leq |u| < 3; \\ 0, & |u| \geq 3. \end{cases}$$

Финитность функций $B_5(u)$ и $B'_5(u)$ обеспечивает высокое быстродействие вычисления сплайн-функций (9) и производных (10) в итерационном методе решения уравнения (4).

Быстродействие сходимости итерационного метода решения уравнения (4) зависит также от алгоритма выбора текущего значения параметра конца дуги u_2 . Этот алгоритм состоит из двух этапов. На первом этапе путем последовательного увеличения с постоянным шагом параметра конца дуги, определяются значения $u_2^- \in u_2^+$ (рис. 3), для которых $S(u_2^-, u_1) \leq H$ и $S(u_2^+, u_1) \geq H$.

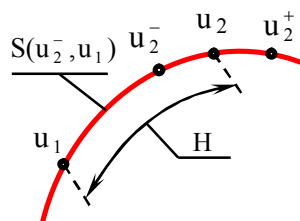


Рис. 3. Поиск параметра конца интегрирования

На втором этапе определяется промежуточное значение $u_2^- < \hat{u}_2 < u_2^+$ и интервал $[u_2^-, u_2^+]$ сжимается до интервала $[\hat{u}_2, u_2^+]$ либо до интервала $[u_2^-, \hat{u}_2]$. Процесс завершается, когда выполнится условие (6).

Промежуточное значение параметра конца дуги проще всего определять по алгоритму половинного деления $\hat{u}_2 = (u_2^+ + u_2^-)/2$, однако быстрее к

достижению цели ведет алгоритм пропорционально-го деления

$$\hat{u}_2 = u_2^- + \frac{H - S(u_2^-, u_1)}{S(u_2^+, u_2^-)} \cdot (u_2^+ - u_2^-). \quad (11)$$

Совокупность математических зависимостей (9) – (11) совместно со стандартной программой численного интегрирования функций по методу Симпсона составляют основу прямого алгоритма стабилизации контурной скорости.

Для практического использования этого алгоритма в существующих системах ЧПУ необходимо, чтобы время расчета сплайновым интерполятором координат позиционирования каждой точки было существенно меньше одного такта управления.

4. Численный эксперимент

Численный эксперимент для проверки точности и быстродействия прямого метода стабилизации контурной скорости проведем на участке криволинейной траектории движения инструмента длиной 155,6 мм, заданной сплайн-функцией пятой степени (рис. 1).

Зададим частоту цикла управления

$$f_{\text{ц}} = 1000 \text{ Гц}$$

и контурную подачу обработки

$$F = 3000 \text{ мм/мин.}$$

Тогда величина такта управления будет равна

$$\tau = 0,001 \text{ сек.};$$

шаг интерполяции

$$H = 0,05 \text{ мм,}$$

а общее количество рассчитываемых интерполятором точек траектории

$$n = 3112.$$

Задавая различную допустимую погрешность ϵ в диапазоне

$$1e^{-1} \leq \epsilon \leq 1e^{-10},$$

определим отношение времени расчета одной интерполяционной точки ($t_{\text{и}}$) к длительности такта управления $K = t_{\text{и}} / \tau$ (табл. 1).

Таблица 1

Среднее относительное время вычисления интерполяционной точки

ϵ	$K_{\text{ср}}$	ϵ	$K_{\text{ср}}$
$1e^{-1}$	0,081	$1e^{-6}$	0,123
$1e^{-2}$	0,082	$1e^{-7}$	0,126
$1e^{-3}$	0,085	$1e^{-8}$	0,127
$1e^{-4}$	0,095	$1e^{-9}$	0,127
$1e^{-5}$	0,113	$1e^{-10}$	0,127

Вычисления проводились на серийном компьютере с процессором средней производительности Intel T3100, 1,9 ГГц.

График изменения среднего времени вычисления интерполяционной точки в зависимости от уменьшения допустимой погрешности представлен на рис. 4.

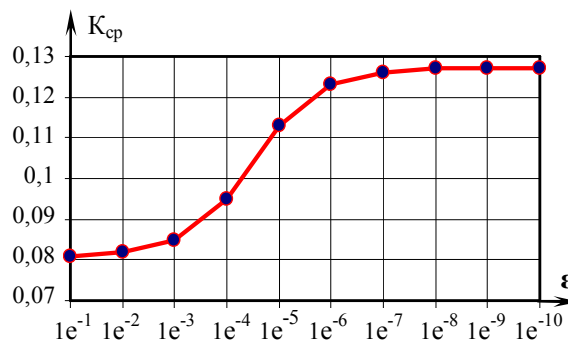


Рис. 4. График изменения времени вычисления интерполяционной точки

Точность расчета шага интерполяции δ_i на каждом цикле управления, посчитанная по формуле (5) в процентах приведена на рис. 5 (для $\epsilon = 1e^{-3}$) и рис. 6 (для $\epsilon = 1e^{-10}$).

Показатели стабильности контурной скорости, обеспечиваемой сплайновым интерполятором для указанных значений допустимой погрешности приведены в табл. 2.

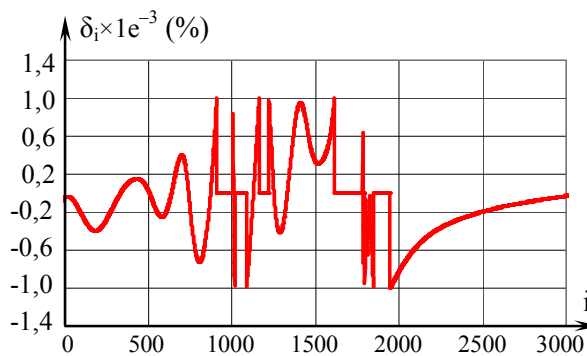


Рис. 5. Точность шага интерполяции для $\epsilon = 1e^{-3}$

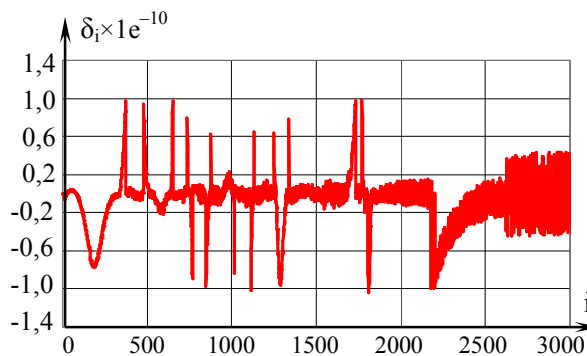


Рис. 6. Точность шага интерполяции для $\epsilon = 1e^{-10}$

Таблица 2
Показатели стабильности контурной скорости

ϵ	δ_{\min}	δ_{\max}	$\delta_{\text{ср}}$
1,0e-03	-1,00e-03	0,998e-03	0,246e-03
1,0e-10	-1,03e-10	0,985e-10	0,169e-10

Заключение

Проанализированы возможные стратегии решения задачи стабилизации контурной скорости для сплайнового интерполятора системы ЧПУ.

Показано, что наиболее перспективной является стратегия прямого вычисления дуговой длины криволинейной траектории обработки на нижнем уровне интерполятора в режиме реального времени, так как эта стратегия обеспечивает получение результата с заданной точностью и не предусматривает создания и использования в процессе обработки вспомогательных функций.

Разработан метод стабилизации контурной скорости на криволинейной траектории обработки, использующий стратегию прямого вычисления дуговой длины.

Проблема сокращения вычислительной нагрузки на нижнем уровне интерполятора решена использованием для моделирования криволинейных траекторий обработки метода оптимального отображения в пространство В-сплайнов, отличающегося высокой вычисляемостью и информативностью.

Результаты эксперимента подтвердили высокую эффективность данного метода, обеспечивающего на процессоре средней производительности точность расчета дуговой длины траектории при трехосевой обработке до $1e-10$ % за время, не превышающее 13 % времени одного такта управления.

Литература

1. Петраков, Ю.В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ [Текст]: моногр. / Ю.В. Петраков. – К.: Січкар, 2011. – 220 с.
2. Кривцов, В.С. Проблемы сплайновой интерполяции с гладко-ограниченными кинематическими параметрами движения в задачах числового программного управления высокоскоростным оборудованием [Текст] / В.С. Кривцов, В.Ф. Сорокин, В.В. Комбаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9(96). – С. 11 – 19.
3. Beudaert, X. Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path

[Text] / X. Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier // *International J. of Machine Tools & Manuf.* – 2012. – Vol. 57. – P. 73 – 82.

4. Erkorkmaz, K. Quintic spline interpolation with minimal feed fluctuation [Text] / K. Erkorkmaz, Y. Altintas // *J. Manuf. Sci. Eng.* – 2005. – Vol. 127. – P. 339 – 349.

5. Сорокин, В. Ф. Сравнение кинематических параметров движения при моделировании траектории высокоскоростной ЧПУ обработки сплайнами третьей и пятой степени [Текст] / В.Ф. Сорокин, В.В. Комбаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 8(95). – С. 11 – 17.

6. Сорокин, В. Ф. Влияние математических параметров гладких траекторий высокоскоростной обработки на кинематические параметры движения рабочих органов оборудования [Текст] / В.Ф. Сорокин, В.В. Комбаров // *Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнар. зб. наук. праць*. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – № 1,2 (44). – С. 231 – 237.

7. Heng, M. Feedrate Optimization of Spline Toolpaths on Machine Tools with Dynamic Uncertainty [Text] / M. Heng, K. Erkorkmaz // *Proceedings of the 21st Canadian Congress of Applied Mechanics, June 3-7, 2007.* – 12 p.

8. Раисов, Ю.А. Корректная постановка задачи формообразования при реализации В-сплайн интерполяции [Текст] / Ю.А. Раисов, И.В. Бычков, Н.И. Бычков // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2010. – № 5. – С. 33 – 38.

9. Heng, M. Design of a NURBS Interpolator with minimal feed fluctuations and continuous feed modulation capability [Text] / M. Heng, K. Erkorkmaz // *International J. of Machine Tools & Manuf.* – 2010. – Vol. 50(3). – P. 281 – 293.

10. Сорокин, В. Ф. Математическая модель сложнофасонной поверхности для адаптивного программного управления металлообрабатывающим оборудованием [Текст] / В. Ф. Сорокин // *Технологические системы*. – 2002. – № 5 (16). – С. 44 – 51.

11. Сорокин, В. Ф. Модифицированный метод приближения функций В-сплайнами [Текст] / В.Ф. Сорокин, В.А. Леховицер, Е.Н. Бут // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – Х.: ГАКУ «ХАИ», 1999. – № 3. – С. 28 – 38.

12. Сорокин, В. Ф. Экономичная форма представления В-сплайнов в инженерных приложениях [Текст] / В. Ф. Сорокин // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2012. – № 55. – С. 42 – 51.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.А. Раисов, Інститут проблем машиностроєння ім. А.Н. Подгорного НАН України. Харків.

МЕТОД ПРЯМОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ КОНТУРНОЇ ШВИДКОСТІ ДЛЯ СПЛАЙНОВОГО ІНТЕРПОЛЯТОРА СИСТЕМИ ЧПУ

В.Ф. Сорокін, В.В. Комбаров, І.О. Тернюк

Розглянуте завдання забезпечення інтерполятором системи ЧПУ високої стабільності контурної швидкості руху інструмента при обробці складно фасонних поверхонь. Розв'язок цього завдання зводиться до високоточного обчислення в режимі реального часу дугової відстані, яку проходить інструмент по криволінійній траєкторії за один такт управління. Показані переваги по точності прямого методу стабілізації контурної швидкості. Запропоноване модель криволінійної траєкторії створювати в класі сплайн-функцій п'ятого ступеня методом оптимального відображення в простір В-сплайнов, що відрізняється високою швидкістю обчислень. Розроблений алгоритм прямого методу стабілізації контурної швидкості. Результати експерименту, підтвердили можливість обчислення прямим методом дугової відстані криволінійної траєкторії із заданою точністю за час суттєво менше одного такту управління.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, система ЧПУ, сплайн, інтерполяція, швидкість, стабілізація.

METHOD OF DIRECT STABILIZATION OF CONTOUR FEEDRATE FOR THE SPLINE INTERPOLATOR CNC SYSTEM

V.F. Sorokin, V.V. Kombarov, I.A. Ternyuk

The task of providing of high stability of contour feedrate of tool movement with CNC system interpolator when processing of complex surfaces is considered. The solution of this problem is reduced to the high-precision calculation of the arc distance that the tool passes along a curvilinear path at a single control cycle in real time. There is shown the accuracy advantages of the direct method of stabilization contour feedrate. There is proposed to build a model of a curvilinear path in the class of spline-functions of the fifth degree by the method of optimal mapping in the space of B-splines characterized by high computability. The algorithm of the direct method of stabilization contour feedrate is developed. The results of the experiment have confirmed the possibility of calculating the arc distance of a curvilinear path with a given accuracy by the direct method for significantly less time than one single control cycle.

Key words: high-speed milling, CNC system, spline interpolation, feedrate, stabilization.

Сорокін Владимир Федорович – д-р техн. наук, проф. каф. технології виробництва авіаційних двигателів Національного аерокосмічного університета ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Комбаров Владимир Викторович – науч. сотр. каф. технології виробництва летательних апаратів Національного аерокосмічного університета ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Тернюк Игорь Александрович – студент Національного аерокосмічного університета ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.