

УДК 621.865

DOI: 10.30987/article_5b28d1939379b2.77194070

В.И. Капля, И.В. Савицкий, Д.А. Мاستиков

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СХВАТА МАНИПУЛЯТОРА ПО РАЗОМКНУТОЙ ТРАЕКТОРИИ, АППРОКСИМИРОВАННОЙ УСЕЧЕННЫМ ДИСКРЕТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ФУРЬЕ

Рассматривается задача аппроксимации плоской траектории движения схвата манипулятора, заданной в виде разомкнутого контура. Предлагается дополнять траекторию обратным ходом, что позволяет получать замкнутый контур с целью повышения качества результатов аппроксимации. Вектор координат подвергается прямому и обрат-

ному дискретному преобразованию Фурье с усечением высокочастотных гармоник.

Ключевые слова: разомкнутая траектория, дискретное преобразование Фурье, усечение дискретного преобразования Фурье, аппроксимация траектории, планирование движения манипулятора, модель движения схвата.

V.I. Kaplya, I.V. Savitsky, D.A. Mastikov

MODEL OF MANIPULATOR GRAPPLE MOTION IN OPEN-ENDED PATH APPROXIMATED WITH FOURIER TRUNCATED DIGITAL TRANSFORM

The approximation problem of the plane path of a manipulator grapple motion, where the path is specified as an open-ended contour is under consideration. The path is formalized as a vector in which the components are coordinates of the sequence of points defining a path form. Each coordinate is a complex number the real part of which corresponds to the coordinate x , and the imaginary part corresponds to the coordinate y .

In the work it is offered to supplement the path with the return that allows obtaining a closed circuit with the purpose of increasing approximation results quality. A coordinate vector is subjected to Fourier discrete transform. High-frequency harmonics of the image obtained are null and Fourier reverse truncated discrete transform is carried out. The coordinate vector obtained is an approximated smoothed path where a level of high-frequency spatial harmonics is decreased.

A numerical simulation of a grapple motion along an approximated path is carried out. The results of numerical experiments have shown that the approximation accuracy through the method offered is considerably higher than that of the methods earlier developed. An assumption on time constancy of manipulator grapple motion between points specifying a path allowed carrying out the simulation of the process of velocity changes and acceleration in the course of the motion along an approximated path. The approximated path allows eliminating drastic velocity and acceleration changes during the grapple motion.

Key words: open-ended path, Fourier discrete transform, truncation of Fourier discrete transform, path approximation, manipulator motion planning, model of grapple motion.

Введение

Проблемы управления манипулятором включают задачу планирования движения схвата (инструмента) манипулятора по заданной траектории, которая во многих случаях состоит из плоских замкнутых или разомкнутых контуров. Планирование движения схвата задает траекторию движения, а также скорости и ускорения, предельные значения которых определяются параметрами инструмента и обрабатываемой поверхности [1]. Кроме того, необхо-

димо учитывать динамические свойства самого манипулятора.

Усеченное преобразование Фурье используется для предварительной обработки данных, в том числе контуров (траекторий) [2], с целью сглаживания и ослабления помеховой высокочастотной составляющей сигналов. В работе [3] предложена аппроксимация траектории движения схвата усеченным преобразованием Фурье в случае движения по замкнутой траектории.

Постановка задачи

Рассматривается способ задания траектории в виде последовательности точек, координаты которых заданы в виде множества пар точек в прямоугольной системе координат и которые должны быть последовательно пройдены инструментом манипулятора. Расстояние между точками контура по каждой оси координат считается равным шагу дискретного перемещения инструмента.

Исследуется задача оценки точности аппроксимации разомкнутой траектории усеченным дискретным рядом Фурье. Особенность разомкнутой траектории по отношению к замкнутой траектории состоит в том, что в случае двумерного дискретного ряда Фурье контур формируется в виде суммы замкнутых эллипсов, а не синусоид, как в одномерном случае. Указанная особенность приводит к тому, что для разомкнутого контура требуется

$$F_k = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} z_j \exp\left(-i \frac{2\pi}{M} k \cdot j\right). \quad (1)$$

Обратное усеченное дискретное преобразование Фурье для вектора F с пара-

$$z_j^u = \sum_{k=0}^u F_k \exp\left(i \frac{2\pi}{M} k \cdot j\right) + \sum_{k=M-u}^{M-1} F_k \exp\left(i \frac{2\pi}{M} k \cdot j\right). \quad (2)$$

Аппроксимация контура путем снижения уровня высокочастотных гармоник за счет их обнуления соответствует двумерной фильтрации прямоугольным окном идеального низкочастотного фильтра [4; 5]. Аппроксимация дает удовлетворитель-

Математическая модель движения схвата

В работе предлагается алгоритм допполнения разомкнутой траектории до замкнутой траектории путем обратного хода контура от конца траектории к её началу. Такой подход позволяет получить замкнутый контур с точками остановки схвата в конце и начале траектории. Обратный ход контура не вносит новой пространственной информации и при реальном перемещении схвата не требует своей реализации.

большее количество гармоник в усеченном образе контура по сравнению с аналогичным замкнутым контуром. Чем больше оставлено высокочастотных гармоник в усеченном образе дискретного преобразования Фурье, тем точнее аппроксимация, но и больше ускорения, которые воздействуют на инструмент при его перемещении по траектории.

Рассматривается контур, заданный последовательностью точек на плоскости с координатами: $\{(x_j, y_j)\}_{j=0..M-1}$. Из пар координат формируется вектор z с комплексными компонентами путем присвоения их действительным частям координат x , а мнимым – координат y : $z_j = x_j + i \cdot y_j$ [2; 3]. Прямое дискретное преобразование Фурье вектора z описывается следующей формулой:

метром усечения u (числом необнуляемых пар гармоник) имеет вид

ные результаты для замкнутых контуров, но в случае разомкнутых контуров, как показывают численные эксперименты, аппроксимацию в окрестностях конечных точек контура признать удовлетворительной нельзя.

Пример траектории движения схвата с отображением обратного замыкающего хода контура приведен на рис. 1. С целью наглядности отображения прямого и обратного хода контура использовался алгоритм равномерного роста вертикальной координаты до середины траектории и равномерного убывания во второй половине траектории. Отображение обратного хода проводилось аналогично, но с отрицательным знаком.

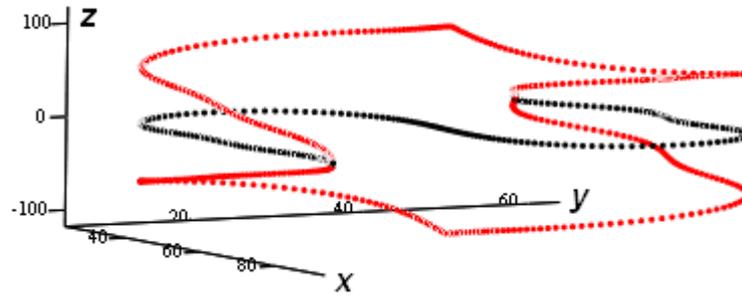


Рис. 1. Исходная, прямая и обратная траектории

Контур с прямым и обратным ходом состоит из увеличенного в два раза количества точек: $n = 0 \dots 2M - 1$, $z_n^c = z_{2M-n}$. Аппроксимация траектории с обратным ходом контура путем усечения дискретно-

го преобразования Фурье определяется прямым и усеченным обратным преобразованием Фурье в соответствии со следующими соотношениями:

$$F_k^c = \frac{1}{2M} \sum_{n=0}^{2M-1} z_n^c \exp\left(-i \frac{\pi}{M} k \cdot n\right), \tag{3}$$

$$z_n^{cu} = \sum_{k=0}^u F_k^c \exp\left(i \frac{\pi}{M} k \cdot n\right) + \sum_{k=2M-u}^{2M-1} F_k^c \exp\left(i \frac{\pi}{M} k \cdot n\right). \tag{4}$$

Соотношения (3) и (4) представляют собой математическую модель движения схвата манипулятора по сглаженной разомкнутой траектории, которая образуется из суммы сравнительно небольшого числа пространственных гармоник. Известны алгоритмы быстрого прямого и обратного

усеченного преобразования Фурье, которые позволяют их реализовать в системах реального времени.

Среднеквадратическая и максимальная радиальная ошибки аппроксимации траектории контуром с обратным ходом определяются по следующим формулам:

$$\sigma(u) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \left(\text{Re}(z_n^{cu} - z_n^c) \right)^2 + \left(\text{Im}(z_n^{cu} - z_n^c) \right)^2}, \tag{5}$$

$$\sigma_m(u) = \sqrt{\max \left(\left(\text{Re}(z_n^{cu} - z_n^c) \right)^2 + \left(\text{Im}(z_n^{cu} - z_n^c) \right)^2 \right)}. \tag{6}$$

Соотношения (5) и (6) позволяют оценить точность аппроксимации траектории предложенным методом. Формула (5) предпочтительнее для обобщенной оценки

качества аппроксимации. Оценка по формуле (6) нужна в том случае, когда задана максимальная погрешность для траектории движения инструмента.

Результаты численного эксперимента по оценке точности аппроксимации

Соотношения (1)-(4) позволили провести численный эксперимент по оценке эффективности предложенного алгоритма для обратного хода контура при получении

замкнутой траектории. На рис. 2 приведены результаты аппроксимации разомкнутой траектории по формулам (1)-(2) и (3)-(4) для контура, состоящего из 223 точек.

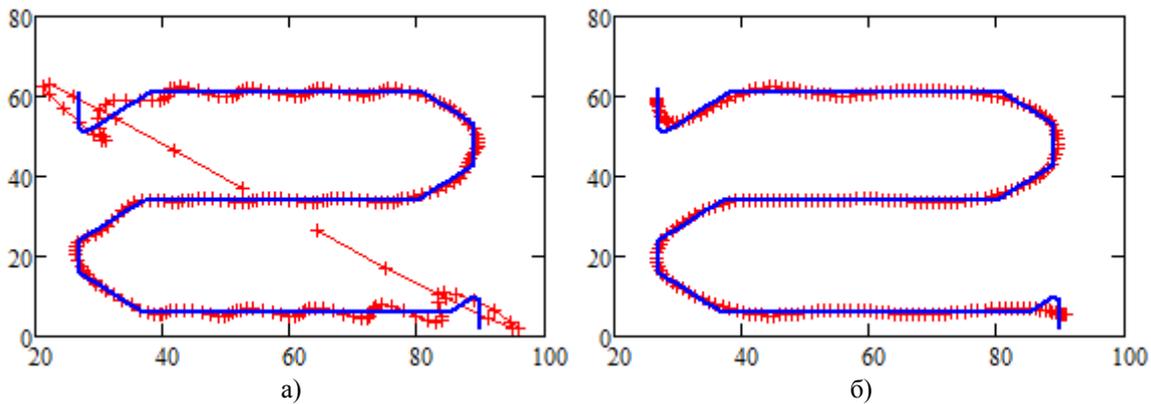


Рис. 2. Результаты аппроксимации траектории при усечении ДПФ до 20 пар гармоник из 223 (446): а - для разомкнутого контура; б - для замкнутого обратным ходом контура

Сравнение рис. 2а и 2б позволяет увидеть, что аппроксимацию на основе соотношений (1)-(2) нельзя признать удовлетворительной из-за больших ошибок аппроксимации, сравнимых с размерами контура, в окрестности конечных точек траектории. В то же время модель (3)-(4) позволяет получить приемлемые по точности результаты аппроксимации во всех точках траектории.

Вариация величины параметра усечения позволяет утверждать, что преимущество предложенного алгоритма аппроксимации на основе дополнения траектории обратным ходом контура сохраняется при любых значениях этого параметра. Зависимость среднеквадратической ошибки аппроксимированной траектории от параметра усечения вычислена по формуле (5) и приведена на рис. 3.

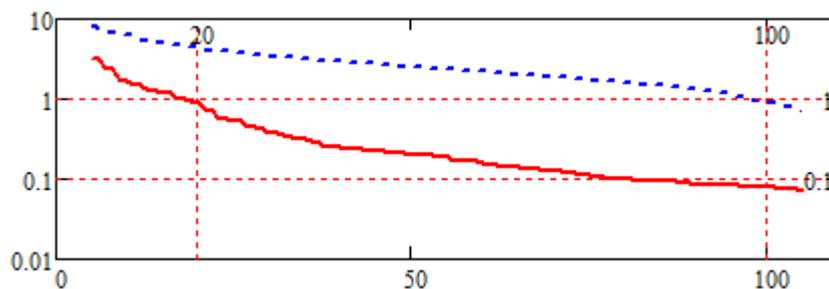


Рис. 3. Зависимость величины среднеквадратической ошибки от числа пар гармоник аппроксимации

Результаты численного эксперимента по оценке параметров движения схвата

Значения скорости и ускорения схвата при его движении по запланированной траектории являются основными характеристиками, определяемыми с помощью модели движения схвата. Целесообразно предположить, что на перемещение схвата из одной точки контура в другую, сосед-

$$Vx_j = (x_j - x_{j-1}) / \Delta t, \tag{7}$$

$$Vy_j = (y_j - y_{j-1}) / \Delta t. \tag{8}$$

Следует заметить, что рекуррентные формулы (7) и (8) требуют предварительного задания скорости в начальной точке. В данной работе начальные скорости при-

ную точку затрачивается одинаковое время Δt при прохождении всех точек траектории. В таком случае компоненты вектора скорости перемещения схвата можно приблизительно оценить следующими величинами:

равнены к нулю: $Vx_0 = Vy_0 = 0$. Результаты вычисления модуля скорости движения схвата $|V_j| = \sqrt{Vx_j^2 + Vy_j^2}$ при движении по

аппроксимированной предложенным выше

методом траектории приведены на рис. 4.

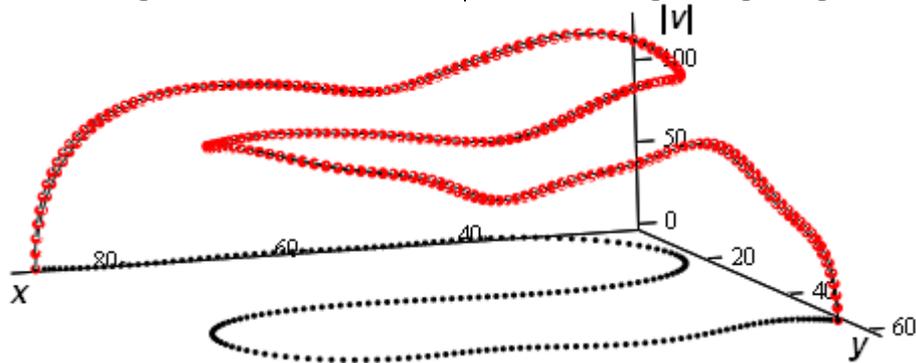


Рис. 4. Модуль скорости в различных точках траектории

На полученном графике хорошо видно наличие участков разгона и торможения схвата соответственно в начале и конце разомкнутой траектории. Между участками разгона и торможения поддерживается относительно высокая скорость движения схвата. Подобный характер изменения скорости присущ двухкоординатным манипуляторам, имеющим привод на шаговых двигателях.

Ускорение схвата при движении по разомкнутой траектории вычисляется на

основе результатов вычисления скорости по формулам (5)-(6) с использованием следующих соотношений:

$$Ax_j = (Vx_j - Vx_{j-1}) / \Delta t,$$

$$Ay_j = (Vy_j - Vy_{j-1}) / \Delta t.$$

Результаты вычисления модуля ускорения движения схвата

$|A_j| = \sqrt{Ax_j^2 + Ay_j^2}$ по аппроксимированной траектории приведены на рис. 5.

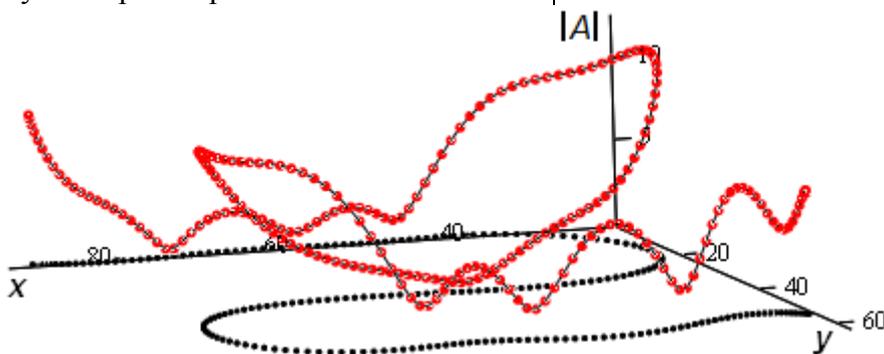


Рис. 5. Модуль ускорения в различных точках траектории

Анализ полученного экспериментального результата показывает, что в начальной и конечной точках траектории модуль ускорения схвата не равен нулю, что соответствует наличию рывка в указанных точках. Скачок ускорения интерпретируется как мгновенное приложение

силы к объекту и является нежелательным явлением при управлении манипуляторами. Однако в случае применения шаговых двигателей рывок с ограниченной величиной ускорения можно считать допустимым и регулировать его величину программными методами.

Заключение

Предложенный метод обратного обхода для разомкнутой траектории движения схвата манипулятора позволяет получить аппроксимированную траекторию с погрешностью менее одного дискретного шага задания траектории. Кроме того,

движение схвата вдоль аппроксимированной разомкнутой траектории может осуществляться с плавным нарастанием скорости в начальной точке и плавным уменьшением скорости в конечной точке. Перечисленные факторы создают условия

для корректного планирования и управле-

ния движением манипулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкевич, С.Л. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 480 с.
2. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. - М.: Финансы и статистика, 2002. - 344 с.
3. Капля, В.И. Оценка динамических параметров движения пера графического манипулятора при аппроксимации траектории низкочастотными дискретными гармониками / В.И. Капля, Е.П. Бойцов, А.Г. Пан // Научное обозрение. - 2015. - № 10. - С. 55-60.
4. Лэй, Э. Цифровая обработка сигналов для инженеров и технических специалистов: практическое руководство / Э. Лэй. - М.: Группа ИТД, 2007. - 336 с.

5. Van der Hoeven, J. The truncated Fourier transform and applications / J. Van der Hoeven // Proc. ISSAC 2004 (Santander, Spain). - NY: ACM Press, 2004. - P. 290-296.
6. Zenkevich S. L. Jushhenko A. S. Osnovy upravleniya manipuljacionnymi robotami. - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. - 480 p.
7. Osovski S. Nejronnye seti dlja obrabotki informacii. - М.: Финансы и статистика, 2002. - 344 p.
8. Kaplya V. I., Bojcov E. P., Pan A. G. Ocenka dinamicheskikh parametrov dvizhenija pera grafičeskogo manipuljatora pri approksimacii traektorii nizkochastotnymi diskretnymi garmonikami. // "Nauchnoe obozrenie" — 10/2015, 55-60 pp.
9. Van der Hoeven J. The truncated Fourier transform and applications // Proc. ISSAC 2004 (Santander, Spain). NY: ACM Press, 2004. P. 290-296.

1. Zenkevich, S.L. *Fundamentals of Manipulation Robot Control* / S.L. Zenkevich, A.S. Yushchenko. - М.: Publishing House of BaumanSTU of Moscow, 2004. - pp. 480.
2. Osovsky, S. *Neural networks for information processing* / S. Osovsky. - М.: *Finances and Statistics*, 2002. - pp. 344.
3. Kaplya, V.I. Dynamic parameter assessment of pen motion in graphic manipulator at path approximation with low-frequency discrete harmonics / V.I. Kaplya, E.P. Boitsov, A.G. Pan // *Scientific Review*. - 2015. - No.10. - pp. 55-60.
4. Lay, E. *Signal Digital Processing for Engineers and Engineering Experts: practical guide* / E. Lay. - М.: ITD Group, 2007. - pp. 336.
5. Van der Hoeven, J. The truncated Fourier transform and applications / J. Van der Hoeven // Proc.

- ISSAC 2004 (Santander, Spain). - NY: ACM Press, 2004. - P. 290-296.
6. Zenkevich S. L. Jushhenko A. S. Osnovy upravleniya manipuljacionnymi robotami. - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. - 480 p.
7. Osovski S. Nejronnye seti dlja obrabotki informacii. - М.: Финансы и статистика, 2002. - 344 p.
8. Kaplya V. I., Bojcov E. P., Pan A. G. Ocenka dinamicheskikh parametrov dvizhenija pera grafičeskogo manipuljatora pri approksimacii traektorii nizkochastotnymi diskretnymi garmonikami. // "Nauchnoe obozrenie" - 10/2015, 55-60 pp.
9. Van der Hoeven, J. The truncated Fourier transform and applications, Proc. ISSAC 2004 (Santander, Spain). NY: ACM Press, 2004. P. 290-296.

Статья поступила в редколлегию 21.03.18.

Рецензент: д.т.н., профессор ВолГТУ

Шевчук В.П.

Сведения об авторах:

Капля Виктор Иванович, к.т.н., доцент кафедры ВАЭ Волжского политехнического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета, e-mail: vik24u@yandex.ru.

Савицкий Игорь Владимирович, магистрант Волжского политехнического института (филиала)

Kaplya Victor Ivanovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. of VAE, Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of Volgograd State Technical University, e-mail: vik24u@yandex.ru.

Savitsky Igor Vladimirovich, Master's degree student, Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of Vol-

гоградского государственного технического университета, e-mail: savickijugor@gmail.com.

Мастиков Дмитрий Андреевич, магистрант Волжского политехнического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета, e-mail: dimamastikov@rambler.ru.

gograd State Technical University, e-mail: savickijugor@gmail.com.

Mastikov Dmitry Andreevich, Master's degree student, Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of Volgograd State Technical University, e-mail: dimamastikov@rambler.ru.