

С. В. КОСАРЕВСКИЙ, В. Н. ЛАТЫПОВ

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОРКИ ВИНТОВЫХ ПАР ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

С целью моделирования сборки винтовых пар деталей машиностроения рассмотрено обобщенное преобразование Хафа для извлечения геометрических примитивов (геликоидов) из трехмерного поля плотностей резьбовых деталей, полученного с помощью компьютерного томографа. Для преобразования поля плотностей в трехмерное изображение и последующего имитационного моделирования применен метода бегущих кубиков сборки. Данные для различных резьб получены на рентгеновском СТ-сканере Carl Zeiss Metrotom 1500.

*Ключевые слова:* компьютерная томография, резьба, моделирование.

**Введение.** Современная теория контроля резьбовых соединений во многом основана на работах Георга Берндта [1], со времени написания которых методы контроля не претерпели качественных изменений. Идея имитационного моделирования сборки деталей и так называемых виртуальных калибров была предложена в 1990-х гг., однако она не была реализована из-за недостаточного развития сканирующих координатно-измерительных машин и отсутствия устройств для промышленной томографии с погрешностью менее 0,1 мм. В начале XXI в. функция моделирования виртуальных калибров была включена в некоторые CAD/CAM-системы проектирования (например, модули к системе CATIA фирмы Dassault Systems), однако ограничивалась применением только гладких калибров, а чаще цилиндрических гладких калибров. Существующие методы не предназначены для моделирования резьбовых соединений с использованием данных компьютерной томографии. Актуальность этой проблемы подтверждают недавние работы зарубежных ученых (J. Mailhea, J. M. Linares, J. M. Sprauela, P. Bourdet, E. Pairel, P. Hernandez, M. Giordano, L. De Chiffre и др.), посвященные вопросам моделирования виртуальных калибров. Развитие методов промышленной компьютерной томографии для метрологии (метротомографии) и сканирующих измерительных систем различного рода позволит получать исходные данные для разрабатываемых алгоритмов и математических моделей. В настоящее время для контроля резьбовых соединений широко используются резьбовые и гладкие калибры, которые позволяют комплексно контролировать резьбу. Калибры большого диаметра (более M100) являются дорогостоящим средством контроля, поскольку они подвержены значительному износу, а операции свинчивания выполняются вручную и могут занимать значительное время. Резьбовые калибры, размеры которых выходят за величину допуска при прямых измерениях, могут быть „свернуты“ с пригодными контрольными калибрами. Применение калибров и прямых измерений параметров не относится к взаимоисключающим методам контроля. Для измерения калибров, в частности, применяется поэлементный контроль (измеряются шаг, средний диаметр, наружный и

внутренний диаметр резьбы), затем, чтобы убедиться в достоверности измерений, используются калибры [2]. Поэлементный контроль более точен, но измерения выполняются не на всей поверхности калибра, поэтому могут быть не учтены отклонения формы. Считается, что для очень маленьких резьб поэлементный контроль непрактичен и использование калибров является наилучшим вариантом. Согласно [2], основной причиной расхождения результатов поэлементного контроля и использования калибров являются отклонения формы поверхности резьбы.

В настоящее время развиваются различные методы поэлементного контроля резьбы, основанные на координатных средствах измерения и компьютерной обработке результатов. Карминьято и Шиффре [3] предложили поэлементно измерять резьбу на координатно-измерительной машине с использованием специального остроконечного игольчатого щупа. В статье [4] рассмотрена возможность определения параметров поврежденных резьб путем распознавания изображения с CCD-видеокамеры. В докладе [5] рассмотрены методы поэлементного контроля внутренней резьбы, основанные на данных лазерного сенсора и CCD-видеокамеры, обеспечивающих оперативный контроль параметров резьбы в автомобильном производстве. В работах [6—8] предложено использовать преобразование Хафа для распознавания плоских сечений резьбы, полученных с приборов измерения профиля.

В последние годы для точных координатных измерений применяются средства компьютерной томографии высокого разрешения как инструмент количественной оценки. В таких задачах особенности образца определяют результаты пространственных измерений. Для достижения высокой точности результатов измерений в алгоритмах построения отсканированной модели необходимо проводить компенсацию различных физических эффектов, возникающих при сканировании. Прослеживаемость результатов измерений, полученных на устройствах компьютерной томографии, обеспечивается применением специальных калибровочных приспособлений, которые в настоящее время получили сертификаты DIN/ISO. Программное обеспечение позволяет строить геометрические элементы по отсканированному полю плотностей и определять на них параметры формы и расположения в соответствии с DIN/ISO. Для оценки точности функционирования систем компьютерной томографии помимо процедуры калибровки применяются аттестованные детали. Алюминиевые детали измеряются на высокоточной координатно-измерительной машине и результаты измерений сравниваются с данными томографии.

**Представление резьбы и извлечение изоповерхности.** Расширим модель, предложенную авторами в работе [2]. Введем следующие обозначения. Пусть  $f(x_1, x_2, x_3)$  — распределение оптической плотности материала детали, полученное с помощью томографа;  $D \subset \mathcal{R}^3$  — область пространства, на которой задана функция  $f$ . В качестве „характерных“ плоских сечений резьбы рассмотрим набор плоскостей  $P_\alpha$ , проходящих через точку  $r = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3)$  — „центр масс“ измеренного объекта. Компоненты  $r$  определяются по формулам

$$\bar{x}_l = \int_D x_l f(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3, \quad l = 0, 1, 2. \quad (1)$$

Общей линией для всех плоскостей  $P_\alpha$  является ось резьбы, в качестве которой выбирается одна из осей симметрии объекта. Направляющие векторы осей симметрии хорошо описываются собственными векторами ковариационной матрицы, составленной из центральных моментов второго порядка [5]:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mu_{200} & \mu_{110} & \mu_{101} \\ \mu_{110} & \mu_{020} & \mu_{011} \\ \mu_{101} & \mu_{011} & \mu_{002} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$\mu_{ijk} = \int_D (x_1 - \bar{x}_1)^i (x_2 - \bar{x}_2)^j (x_3 - \bar{x}_3)^k f(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3. \quad (3)$$

Рассмотрим систему координат, координатными поверхностями которой являются геликоиды:

$$\left. \begin{aligned} x &= w \left( 1 + |u| \frac{H}{D} \right) \sin(Rv + \pi u), \\ y &= w \left( 1 + |u| \frac{H}{D} \right) \cos(Rv + \pi u), \\ z &= v, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$u \in [-1; 1]; v \in [0; V]; w \in [0; +\infty).$$

Для определения принадлежности точки  $(x; y; z)$  поверхности (4) необходимо выполнить преобразование  $(x; y; z) \rightarrow (u; v; w)$ . Также заметим, что

$$x^2 + y^2 = w^2 \left( 1 + |u| \frac{H}{D} \right)^2$$

и

$$\frac{x}{y} = \operatorname{tg}(Rv + \pi u),$$

поэтому

$$u = \frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{x}{y} - Rz\right)}{\pi}; u \in [-1; 1], v = z, w = + \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{1 + |u| \frac{H}{D}}. \quad (5)$$

Убедимся, что плоские сечения поверхности  $w = D$  являются кусочно-линейными. В проекции на плоскость  $Oyz$  имеем  $x = 0$ , т.е.  $\sin(Rv + \pi u) = 0$  или

$$\left. \begin{aligned} Rv + \pi u &= \pi k; u = \left[ \frac{\pi k - Rv}{\pi} \right]; u \in [-1; 1], \\ y &= (-1)^k w \left( 1 + |u| \frac{H}{D} \right), \\ z &= v. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Метрическую резьбу однозначно характеризуют следующие параметры [1]:  $P$  — шаг, т.е. расстояние между одноименными боковыми сторонами профиля;  $H$  — высота исходного треугольника;  $D$  — номинальный диаметр. В соответствии с [1] примем:

$$c = \frac{1}{8} H. \quad (7)$$

Угол профиля метрической резьбы  $\alpha = 60^\circ$ , тогда  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{P}{2H}$ , и из соотношений (7) получим:

$$c = \frac{P}{16 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

Плоское сечение метрической резьбы представляет собой одно из плоских сечений координатной поверхности (4), усеченное с двух сторон в соответствии с величиной  $c$ .

Для извлечения изоповерхности из скалярного поля плотностей воспользуемся следующим алгоритмом [6].

1. *Получить скалярное поле плотностей.* Сканирование выполняется на компьютерном томографе (для оценки правильности реализации алгоритма используются автогенерированные данные).

2. *Выполнить сегментацию.* С использованием отсечки по константе скалярное поле плотностей приводится к бинарным значениям 0 и 1 (1 — материал детали). На рис. 1 показан результат сегментации наружной резьбы М5 при пороге отсечения 0,48 [6].

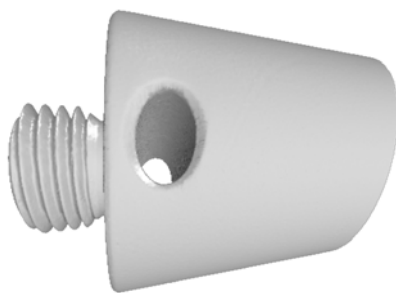


Рис. 1

3. *Найти ось резьбы.* Вычисляется ковариационная матрица по формуле (2) и находятся ее собственные векторы. После этого определяется ось резьбы, через которую далее будут строиться плоские сечения.

Далее применяется метод бегущих кубиков (marching cubes [9]) на равномерной сетке  $1024 \times 1024 \times 1024$  для построения полигональной модели резьбы, которая будет использована при моделировании сборки резьбы с виртуальным резьбовым калибром.

**Моделирование сборки.** Для моделирования сборки винтовой пары были подготовлены CAD-модели виртуальных резьбовых калибров — двух колец (рис. 2) и пробки (рис. 3).

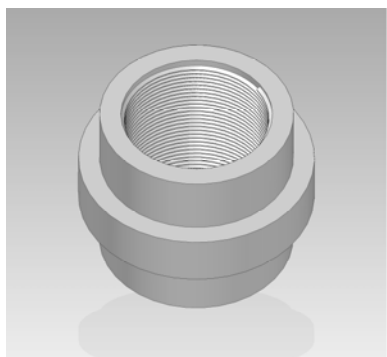


Рис. 2

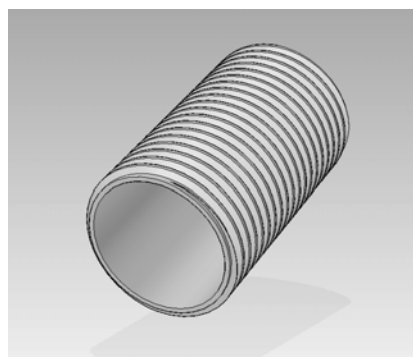
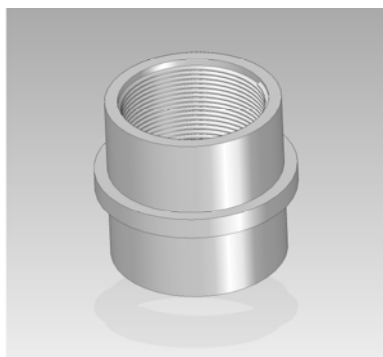


Рис. 3

На томографе Carl Zeiss Metrotom 1500 были отсканированы два алюминиевых образца с метрической резьбой: наружной М5 и внутренней М5. CAD-модели и триангулированные изоповерхности отсканированных резьб были сохранены в формате STL (stereolithography).

Моделирование сборки выполнялось с помощью библиотеки ODE (Open Dynamics Engine, <<http://www.ode.org>>). Для представления поверхности контакта резьбы использовалась иерархия ограничивающих объемов (Bounding Volume Hierarchy, BVH) из ориентированных параллелепипедов.

Путем построения и растеризации сечений полученной полигональной модели возможно сравнить результаты метода бегущих кубиков с результатами метода плоских сечений, предложенного в работе [6]. Стандартные отклонения параметров  $P$ ,  $D$  и  $H$  менее 0,001 мм, что приемлемо для задачи контроля резьбы на производстве [10].

**Выводы.** В отличие от резьбового калибра предложенный метод контроля резьбы обеспечивает получение не только ответа „годен“ или „не годен“, но и информации, о том, какие именно элементы резьбы изготовлены неправильно. Это важно для принятия дальнейших технологических решений в процессе производства.

Для облегчения принятия технологических решений необходимо обеспечить возможность наглядной визуализации полученных результатов, так, например, величина зазоров между моделью резьбового калибра и проверяемой резьбой может быть представлена трехмерной эпюрой. Разработка программы визуализации может стать одним из дальнейших направлений развития настоящей работы.

Предложенный метод также требует разработки методов оптимизации, которые позволят ускорить построение BVH-иерархии, поскольку именно построение дерева ограничивающих объемов является самой времязатратной операцией данного метода.

Работа подготовлена при поддержке гранта ОПТЭК – Carl Zeiss 2012. При визуализации изображений использованы библиотеки Linderdaum Engine и Linderdaum Volume Rendering Library <<http://www.linderdaum.com>>, разработанные авторами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24705-2004 (ИСО 724:1993) Резьба метрическая. Основные размеры. М.: Стандартинформ, 2005.
2. *Косаревский С. В., Латыпов В. Н.* Математическое моделирование комплексного контроля резьбы на основе данных, полученных с устройств компьютерной томографии // Математическое моделирование. 2011. № 6(23). С. 68—80.
3. *Kosarevsky S., Latypov V.* Development of an algorithm to detect screw threads in planar point clouds // Measurement Science Review. 2010. Vol. 10, N 4. P. 136—141.
4. *Kosarevsky S., Latypov V.* Practical procedure for position tolerance uncertainty determination via Monte-Carlo error propagation // Measurement Sci. Rev. 2012. Vol. 12, N 1. P. 1—7.
5. *Lorenson W. E., Cline H. E.* Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm // Computer Graphics. 1987. Vol. 21, N 4.
6. *Berndt G.* Die Anlagekorrekturen bei der Bestimmung des Flankendurchmessers von symmetrischen und unsymmetrischen Aussen- und Innengewinden nach der Dreidrahtmethode oder mittels zweier Kugeln // Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1940. Bd. 60.
7. *Carmignato S., De Chiffre L.* A new method for thread calibration on coordinate measuring machines // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2003. Vol. 52. P. 447—450.
8. *Katz R., Zhang H., Hong E.* Internal thread measurement. NSF Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems. Michigan, 2009.
9. *He F.J., Zhang R.J., Du Z.J., Cui X.M.* Non-contact measurement of damaged external tapered thread based on linead array CCD // J. of Physics: Conf. Ser. Intern. Symp. on Instrumentation Science, Technology. 2006. Vol. 48. P. 676—680.
10. NPL Notes on Screw Gauges. National Physical Laboratory [Электронный ресурс]: <<http://www.npl.co.uk/science-+technology/dimensional/dimensional-measurements/npl-notes-on-screw-gauges>>.

- Сергей Владимирович Косаревский** — *Сведения об авторах* — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт машиностроения, кафедра технологии, оборудования и автоматизации машиностроительных производств; E-mail: kosarevsky@mail.ru
- Виктор Николаевич Латыпов** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский государственный университет

Рекомендована кафедрой  
технологии, оборудования  
и автоматизации  
машиностроительных производств

Поступила в редакцию  
09.11.13 г.

УДК 621.833

И. М. ЕГОРОВ, С. А. АЛЕКСАНИН, М. Е. ФЕДОСОВСКИЙ, А. С. ПТИЦЫНА

## ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КРИВОШИПОВ НА КИНЕМАТИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ ПЛАНЕТАРНОГО ЦЕВОЧНОГО РЕДУКТОРА

Рассматривается влияние погрешностей элементов механизма параллельных кривошипов на кинематическую точность планетарного цевочного редуктора типа k-h-v. Приведена методика определения ошибки угла поворота выходного вала для случаев применения одного и двух сателлитов.

**Ключевые слова:** планетарный редуктор, цевочная передача, циклоидальное зацепление, кинематическая погрешность, ошибка положения, высшая кинематическая пара, профильная нормаль.

Планетарные цевочные редукторы (ПЦР) типа k-h-v широко применяются в приводах мехатронных и робототехнических систем, к которым предъявляются повышенные требования по кинематической точности и жесткости. На рис. 1 представлен ПЦР, здесь 1 — цевка; 2 — 1-й сателлит; 3 — отверстие 1-го сателлита; 4 — 2-й сателлит; 5 — отверстие 2-го сателлита; 6 — палец выходного вала;  $O$  — центральная ось;  $O_{g1}$  — ось 1-го сателлита 1;  $O_{g2}$  — ось 2-го сателлита.

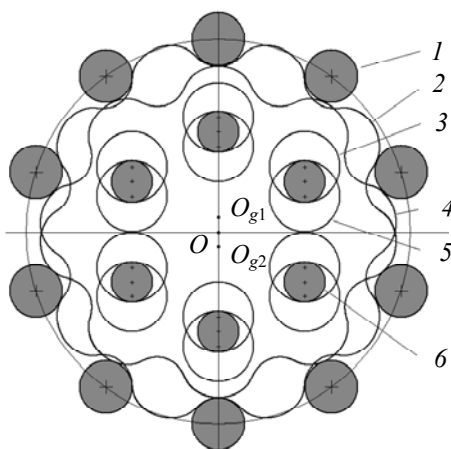


Рис. 1

В ПЦР наряду с циклоидальным зацеплением применяется механизм v, преобразующий планетарное движение сателлитов во вращательное движение выходного вала. В качестве такого механизма в ряде случаев применяется крестовая муфта с промежуточными телами качения [1]. В редукторах типа gv осуществляется передача вращения на фланцы выходного вала непосредственно колленчатыми валами сателлитов [2]. Благодаря простоте конструкции наиболее широко применяется механизм, который за счет замены высших кинематических пар на низшие преобразуется в механизм параллельных кривошипов [3—7].

Общие методы расчета точности механизмов рассмотрены в работе [8], точности механизмов с высшими кинематическими парами посвящены работы [9, 10].

Первичные ошибки зацепления  $i$ -го отверстия сателлита с пальцем выходного вала представлены на рис. 2, здесь  $P$  — полюс зацепления;  $XOY$  — система координат, жестко свя-