

УДК 65.015.13

Е.Г. Коржов, Ю.А. Павлов

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕИНЖЕНИРИНГА
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И РЕСТАВРАЦИИ
СКУЛЬПТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Сохранение скульптурного наследия, создание копий-реплик произведений искусства является актуальной задачей, которая без нового подхода к процессам измерения и контроля качества не может быть успешно решена
Ключевые слова: реинжиниринг, обратный инжиниринг, реставрация.

Семинар № 9

Обратная разработка (обратный инжиниринг, реверс-инжиниринг, реинжиниринг; англ. reverse engineering) — исследование некоторого устройства или программы, а также документации на них с целью понять принципы его работы в случае необходимости воспроизведения устройства, программы или иного объекта с аналогичными функциями, но без копирования как такового. Этот метод применяется обычно в том случае, когда создатель оригинального объекта не предоставил информации о структуре и способе изготовления (производства) объекта.

При производстве, реставрации и репликации сложных скульптурных изделий необходимы компьютерные технологии моделирования и ввода информации о пространственном объекте. Широко применяемые в машиностроении контактные измерительные системы непригодны для измерения художественных изделий из-за возможного механического изменения и даже разрушения объекта искусства.

Наиболее распространенной последовательностью обратного инжиниринга в производстве является предварительное макетирование объ-

екта, например из гипса, далее измерение и создание математической 3D модели объекта. Области применения: изготовление штамповой оснастки в автомобильной промышленности, разработка новых игрушек, изготовление изделий из хрусталя, изготовление масштабных копий сложных скульптурных и ювелирных изделий.

Различают несколько технологий трехмерного сканирования, ни одна из которых не является стандартом в промышленности [4]. Происходит это во многом потому, что нет технологий без недостатков. У каждой из используемых технологий есть свои плюсы и минусы. Можно подразделить все существующие технологии 3D-сканирования на два типа: контактные и бесконтактные или дистанционные.

К контактными измерительным устройствам относят устройства, которые работают по принципу обводки контура посредством сенсора-щупа. К бесконтактным измерительным устройствам относят трехмерные сканеры, использующие более сложную и передовую лазерную технологию. Большинство из данного типа устройств совмещают в себе следующие приборы: лазерные датчики, которые

заменяют контактный сенсор, а также цифровую фототехнику, которая используется для большей точности сканирования и, самое главное, она позволяет получить модель объекта с текстурами. Технология лазерного сканирования продолжает развиваться по трем главным направлениям: сканирование по зонам, точкам и полосам [3]. Лучшие результаты демонстрирует технология сканирования по полосам. На объект проецируется специальная сетка или полоса, положение которой записывается внешними видеокамерами; по ее искажениям определяется контур сканируемой поверхности. Постепенно, по мере сканирования модели от одного края до другого, выстраивается точный образ ее поверхности и записывается трехмерная текстура.

Применительно к камнеобрабатывающей отрасли при производстве скульптурных изделий имеет смысл автоматизировать процесс измерения и воспроизводства объекта в нужном масштабе с целью реконструкции, реставрации или создания копии.

В связи с этим активно внедряются и разрабатываются системы бесконтактного измерения, лежащие в основе современного принципа реинжиниринга.

С использованием бесконтактного измерительного прибора, при наличии физического объекта данная задача сводится к следующему алгоритму (рис. 1):

- бесконтактное измерение образца детали, эталона, мастер-модели;
- создание математической компьютерной модели по результатам измерений;
- формирование траекторий инструмента для механической обработки материала на технологическом

оборудовании с ЧПУ по созданной компьютерной модели.

Для решения задач обратного инжиниринга применяются различные алгоритмы, системы и измерительные приборы, ориентированные на достижение определенного конечного результата. Каждая из них имеет свои особенности и область применения. Для создания копий скульптур и производства реставрационно-восстановительных работ требуется произвести измерения объекта без механического воздействия и нанесения какого-либо вреда, а именно – произвести обмеры, по возможности не извлекая объект из его естественной среды. Следовательно, применение бесконтактного измерения в данном случае актуально.

Для бесконтактных измерений, обработки метрологических данных, осуществления контроля качества целесообразно использовать отечественный программно-аппаратный комплекс «Форма» (рис. 2), разработанный отечественной фирмой «Логос» [1].

Данный программно-аппаратный комплекс характеризуется высокой точностью измерения (0,01 мм), гибкой масштабируемостью программной и аппаратной составляющей за счет использования доступных аппаратных компонентов и открытостью исходных кодов программной части. Предназначен для проведения обмеров (оцифровки) одного вида детали с выдачей результатов в виде файла с координатами точек, поверхности или «пленки» в виде текстового STL-файла и анализ отклонений поверхностей от заданных стандартных геометрических типов или STL-моделей. В отличие от лазерных измерительных приборов, в качестве источника проецирования используется цифровой видеопроектор.

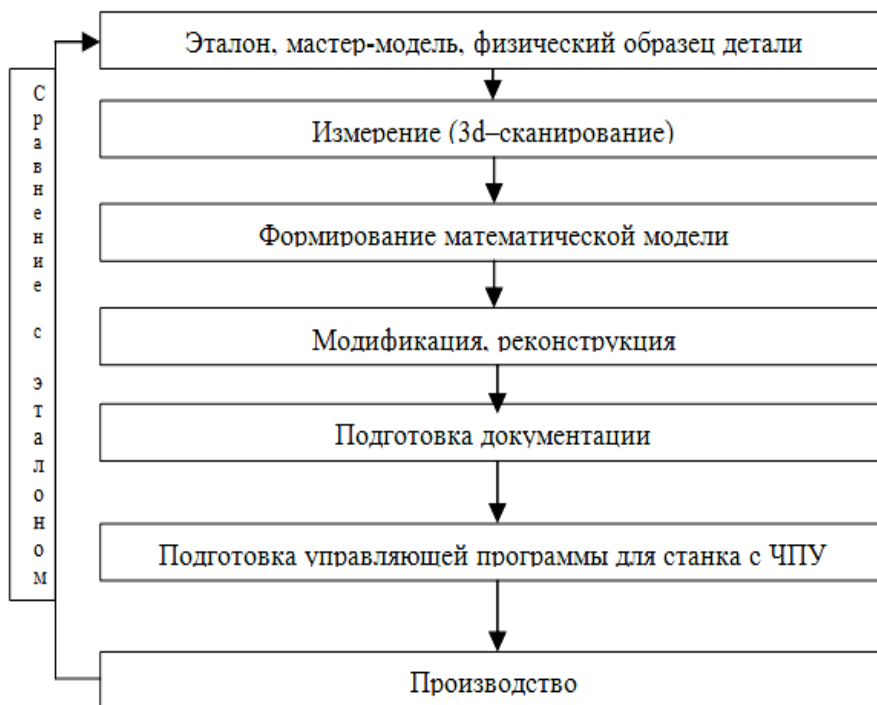


Рис. 1. Реинжиниринг в технологическом процессе создания копии объекта



Рис. 2. Компоненты измерительного комплекса «Форма»

Измерительный комплекс относится к системам измерения, основанным на проецировании полос. Комплекс состоит из программной части, позволяющей производить манипуляции с данными измерений и аппаратной, непосредственно производящей из-

мерения. В аппаратную часть входит мультимедийный LCD проектор, который проецирует синусоидальный вертикальный и горизонтальный растр различной толщины на объект измерения, видеокамера, синхронизированная с проектором, которая фиксирует на различных выдержках проекции растра на объекте, тест объект для настройки оптической системы.

Принцип обратного инжиниринга в системе реализован с использованием технологии бесконтактного измерения формы объекта на основании проецирования синусоидального растра на объект, его регистрации фотометрической системой с последующим анализом полученных изображений для восстановления трехмерной компьютерной модели объекта (рис. 3).

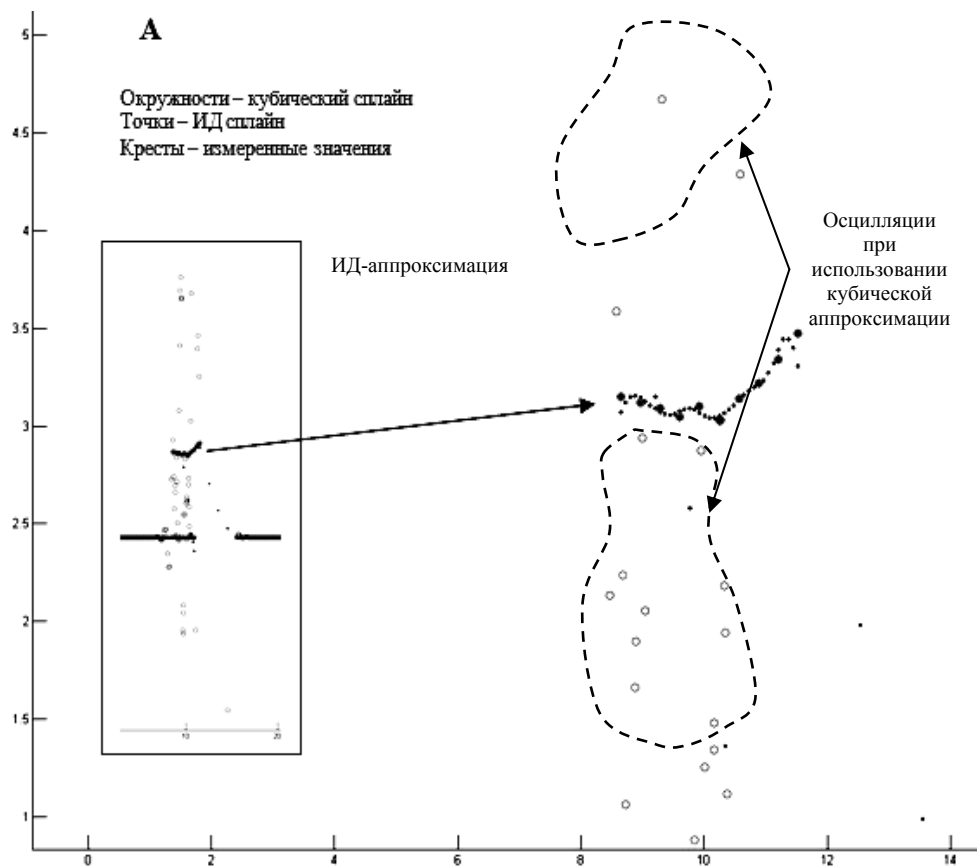


Рис. 3. Результат аппроксимации выбранного сечения кубическим сплайном и ИД-сплайном

Однако измерительный комплекс должен иметь возможность оптимальным образом интерпретировать метрологические данные и оптимизировать их под технологический процесс на оборудовании с ЧПУ. В связи с такой задачей был разработан программный модуль аппроксимации данных на основе интегро-дифференциальных сплайнов слабого сглаживания, математическая модель которого была реализован в прикладном комплексе вычисления и автоматизации расчетов – Matlab. Традиционно, для аппроксимации различных экспериментальных данных использу-

ют кубические сплайны. Из теории известно, что недостатком кубических сплайнов является то, что они склонны к осцилляции в окрестности точки, существенно отличающейся от своих соседей. Анализ показал невозможность применения кубических сплайнов для поставленной задачи сглаживания данных, несущих информацию о кривизне поверхности скульптурной формы.

Таким образом, полученные данные измерений подвергались предварительному слабому сглаживанию и формировались рабочие сечения, для траекторий движения инструмента

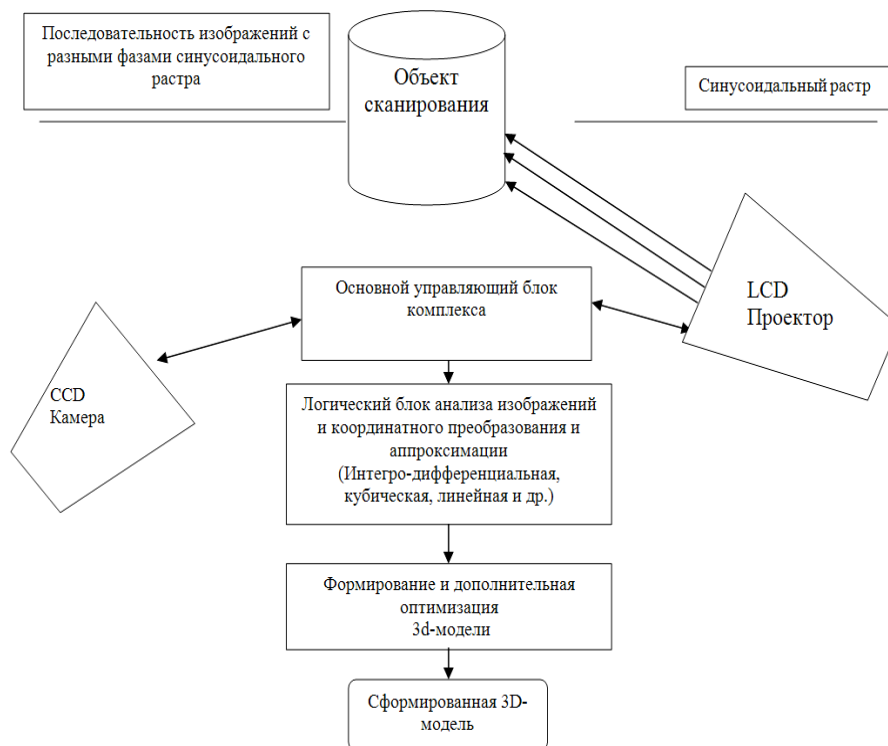


Рис. 4. Принципиальная схема измерительного комплекса «Форма»

для станков с ЧПУ, записанные в файловом формате stl. и txt.

Внедрение данного типа аппроксимации позволило проводить быстрое сглаживание поверхности и избежать шумов, обусловленных работой электронных компонентов системы и нескольких преобразований сигналов, подаваемых видеоадаптером на проектор, далее считываемый камерой и обрабатываемый программным комплексом. Также данный метод позволил обрабатывать и сглаживать создаваемые сечения объекта при записи и подготовки STL-файлов для работы с внешними технологическими системами подготовки производства (САМ-комплексы).

Идея обработки экспериментальных данных заключается в выборке из

результатирующего файла измеренных координат данных, соответствующих проходам измерительного устройства и проведения на основании полученных данных сплайнов, описывающих контуры поверхности тела. Фактически тело разделяем на сечения, проведенные на основании экспериментальных данных, интегро-дифференциальными сплайнами (рис. 4).

На основании параболического интегро-дифференциального многочлена [2]:

$$\begin{aligned}
 S_{2,i}^{(l)}(x) = & f_i + \\
 & + \left(\frac{6}{h_{i+1}^2} \nabla I_i^{i+1} - \frac{2}{h_{i+1}} \Delta \tilde{f}_i \right) (x - x_i) + \\
 & + \left(\frac{6}{h_{i+1}^3} \nabla I_i^{i+1} + \frac{3}{h_{i+1}^2} \Delta \tilde{f}_i \right) (x - x_i)^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

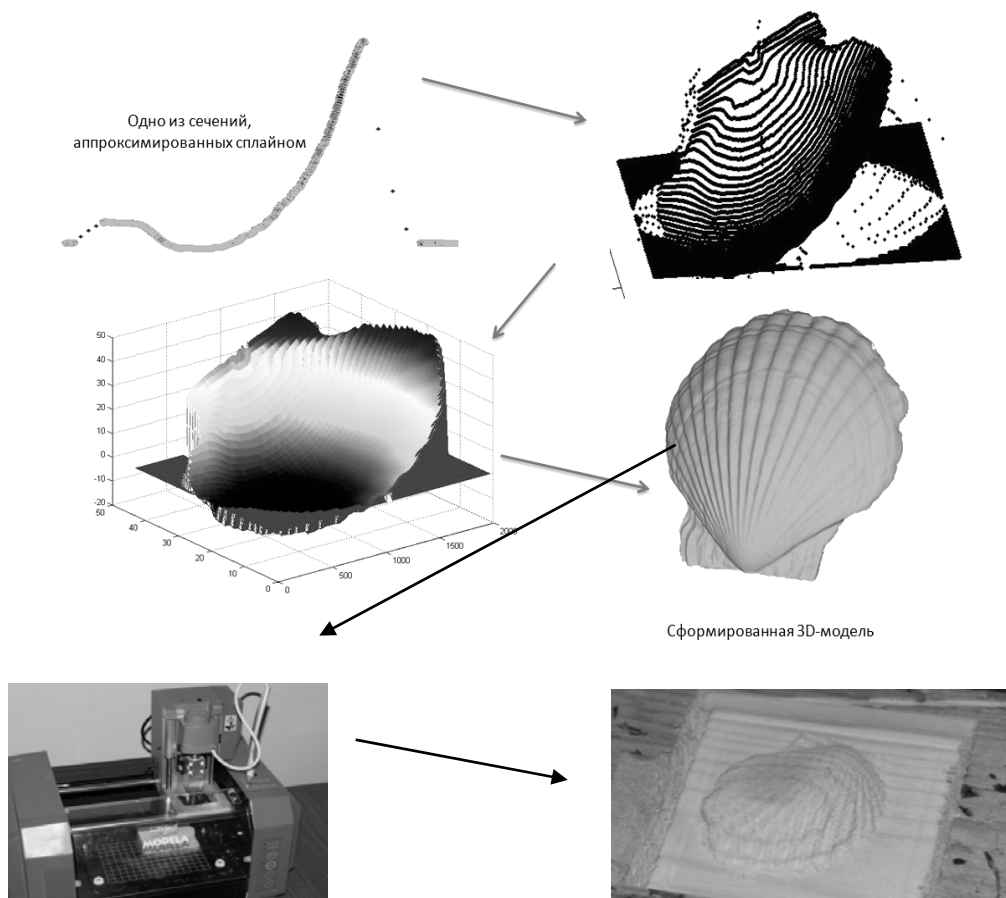


Рис. 5. Процесс бесконтактного измерения и технологической реализации объекта на оборудовании с ЧПУ

в полиномиальной форме, взятого в качестве общей формулы звена будущего сплайна, и параметрической системы

$$\begin{aligned}
 \tilde{S}_{2,из1}^{(crn)}(x) = & \tilde{f}_i + \\
 & + \left(\frac{6}{h_{i+1}^2} \nabla I_i^{i+1} - \frac{2}{h_{i+1}} \Delta \tilde{f}_i \right) (x - x_i) + \\
 & + \left(\frac{6}{h_{i+1}^3} \nabla I_i^{i+1} + \frac{3}{h_{i+1}^2} \Delta \tilde{f}_i \right) (x - x_i)^2 \\
 & (i = \overline{0, n-1}).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{h_i} \tilde{f}_{i-1} + 2 \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{i+1}} \right) \tilde{f}_i + \frac{1}{h_{i+1}} \tilde{f}_{i+1} = \\
 = 3 \left(\frac{I_{i-1}^i}{h_i^2} + \frac{I_i^{i+1}}{h_{i+1}^2} \right), (i = \overline{1, n-1})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

решается задача аппроксимации данных измерений, которая была адаптирована под систему «Форма» (рис. 5).

Таким образом, программно аппаратный комплекс «Форма» с интегро-дифференциальным модулем аппроксимации данных позволяет выполнять



Рис. 6. Исходный объект и процесс измерения комплексом «Форма»

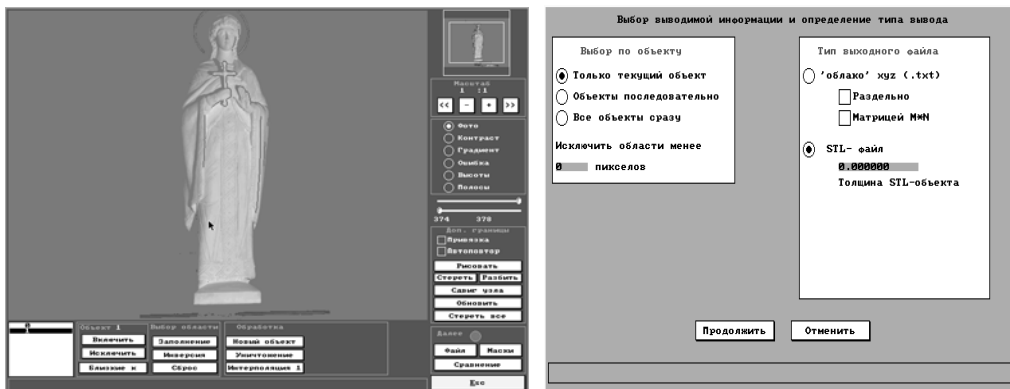


Рис. 7. Этап выборки информации для вывода во внешний файл в комплексе «Форма»



Рис. 8. Результат сканирования скульптуры и ее вывод во внешний 3D-формат



Рис. 9. Существующий интерьер МГГУ и расположенные в нем скульптурные фигуры

измерения, обработку и подготовку 3D-объектов для дальнейшей модификации, реставрации и использования в технологическом процессе на оборудовании с ЧПУ.

Рассмотрим процесс бесконтактного измерения на примере сканирования гипсовой модели скульптуры Святой Варвары – покровительницы горняков (скульптор А. Степанов, каф. ТХОМ, МГГУ). На основании полученной 3D-модели скульптуры выполнен дизайн-проект по улучшению интерьера Московского государственного горного университета.

На рис. 6, 7 и 8 представлен процесс измерения, обработки и вывода информации об измеренном объекте во внешний файл. В результате измерений создаётся виртуальная копия физического объекта, готовая к модификации в программах 3D-дизайна и загрузке в САМ-комплекс подготовки управляющей программы для обработки на технологическом оборудовании с ЧПУ.

В результате восстановления некоторых деталей объекта, подбора текстуры и вписывания объекта в имеющийся интерьер были получены

композиционные решения, представленные на рис. 9.

Таким образом, бесконтактный измерительный комплекс «Форма» и встроенный в него интегро-дифференциальный алгоритм аппроксимации данных позволяют использовать новый эффективный метод компьютерного реинжиниринга художественных и технических объектов для воспроизводства, масштабирования, изучения, реконструкции и каталогизации.

Качество промышленного изготовления и реставрации скульптурных объектов методом компьютерного реинжиниринга достигается комплексным системным подходом дизайна, проектирования технологической подготовки производства и метрологии.

Процесс художественного проектирования художественных изделий необходимо интегрировать с технологической подготовкой производства.

Метрологический контроль качества целесообразно осуществлять бесконтактным методом измерения и методом сравнения результатов измерений с эталонной математической моделью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Руководство* пользователя системой «Форма». – М.: Фирма «Логос», 2008.
2. *Пантелеев А.В., Киреев В.И.* Численные методы в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2004. – 480 с.
3. *A. Patrioli, G. Sansoni, F. Docchio.* OPL-3D: A novel, portable optical digitizer for fast acquisition of free-form surfaces // 1NFM and Laboratory of Optoelectronics. University of Brescia, Italy.
4. *B. Curless, M. Levoy.* Better Optical Triangulation through Space-time Analysis // Computer Systems Laboratory of Stanford University, USA. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Коржов Е.Г. – аспирант кафедры Технологии художественной обработки материалов, design@nellaria.ru

Павлов Ю.А. – профессор кафедры Технологии художественной обработки материалов, jathom@list.ru

Московский государственный горный университет
Moscow State Mining University, Russia



ОТДЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ ПРЕПРИНТ

Певзнер Л.Д., Костиков В.Г., Костиков Р.В., Камолов И.А.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ТОКОСЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ. Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня. — 2009. — №12, —54 с. — М: издательство «Горная книга»

ISSN 0236-1493

Разработана методика, позволяющая оценить влияние скорости взаимного перемещения контактов и теплофизических констант материалов на температурный режим токоведущего кольца.

Peuzner L.D., Kostikov V.G., Kostikov R.V., Kamolov I.A.

DESIGN PROCEDURE AND RESEARCH OF TEMPERATURE MODES OF CURRENT-COLLECTING DEVICES

It is developed the technique allowing to estimate influence of speed of mutual moving of contacts and thermal constants of materials on a temperature mode of a coll-ring.