

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В КОМПАКТНОЙ СИСТЕМЕ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

Ю.В. ПОЛОЗКОВ<sup>1\*</sup>, Д.Н. СВИРСКИЙ<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Витебский государственный технологический университет, Московский проспект, 72, 210028, г. Витебск, Беларусь.

<sup>2</sup>Институт технической кибернетики НАН Беларуси, ул. Сурганова, 6, 220012, г. Минск, Беларусь.

*Анализ проблем конструкторско-технологической подготовки производства показал необходимость включения в производственную систему быстрого прототипирования локального модуля трехмерного сканирования. В статье исследуются известные структурно-технологические решения трехмерного сканирования, а также предлагается вариант рациональной конфигурации и функциональная схема модуля трехмерного сканирования, реализующего процесс видеосъемки. Приводится пример построения компактной интегрированной системы быстрого прототипирования, включающей модуль трехмерного сканирования.*

### **Введение**

Эффективное решение проблемы формообразования сложных (нерегулярных) поверхностей является одним из ключевых факторов обеспечения рентабельности производства современных промышленных изделий. Интеграция элементов САПР и технологий быстрого прототипирования активизировала разработку компактных систем рекурсивного копирования нерегулярных поверхностей, внедрение которых способствует достижению максимальной эффективности при минимальном уровне ресурсной избыточности [1]. Для адаптивной настройки компактной производственной системы в условиях переменного профиля продукции необходим

модуль трехмерного сканирования, обеспечивающий оперативный ввод геометрической информации путем оцифровки пространственно сложных объектов. Это позволяет существенно снизить затраты на подготовку и проведение производственного процесса, а также обеспечить стабильность функционирования системы в автоматизированном режиме. Кроме того, трехмерное сканирование способствует проведению стратегии активного накопления производственного опыта, которая предполагает формирование на основе получаемых цифровых моделей базы графических данных, что интенсифицирует процесс генерации новых интересных форм промышленных изделий.

### **Постановка задачи**

Использование универсальных физико-технических эффектов технологий быстрого прототипирования и легко адаптируемого к изменениям потока заказов программно-технического комплекса позволяет эффективно реализовывать высоко художественные проектные решения объектов производства, имеющих высокую степень нерегулярности формы.

Проектные решения, отвечающие наперед заданным функционально-техническим требованиям, создаются с помощью проектного многовариантного компьютерного моделирования. Однако работа в таком режиме требует наличия и оперирования значительными объемами информации. Возникает проблема априорного информационного обеспечения, разрешение которой состоит в интеграции в производственную систему модуля трехмерного сканирования (оцифровки) ранее изготовленных материальных объектов, макетов, прототипов продукции, а также их элементов. Для выбора оптимального структурно-технологического решения трехмерного сканирования требуется провести исследование существующих сканирующих средств и технологий и на основе оценки их функционально-

---

\* Автор, с которым следует вести переписку

стоимостных показателей принять в качестве базового вариант, удовлетворяющий основным принципам обеспечения компактности производственной системы [2].

### **Структурно-технологические решения контактного и бесконтактного трехмерного сканирования.**

В теоретико-информационном понимании трехмерное сканирование представляется процессом информационного взаимодействия специального технического средства с носителем информации - физическим объектом, при котором происходит перевод априорной аналоговой информации о геометрическом строении объекта в цифровую форму. Импортная в компьютер с устройства ввода цифровая информация организуется в среде программного обеспечения в локальные массивы - цифровые модели объектов. Составляющими элементами цифровых моделей объектов выступают численные параметры, отражающие, главным образом, пространственную ориентацию дискретных элементарных объемов сканируемого объекта. На основе цифровых моделей объектов в режиме графического редактора для визуального восприятия и повышения удобства работы пользователя могут генерироваться виртуальные модели.

Особенности структурно-технологического исполнения систем трехмерного сканирования определяются принципиальным отличием во взаимодействии активных элементов сканирующих систем с носителем информации. Анализ проблемной области показал, что по принципу взаимодействия с исследуемым объектом сканирующие системы группируются в два конкурирующих класса - реализующие контактный и бесконтактный принципы (рис. 1) [3]. Контактный принцип взят за основу в традиционных системах, где оцифровка поверхностей производится в непосредственном контакте измерительных элементов с объектом исследования.

Фирма Immersion Corporation (США) создала ручной электромеханический дигитайзер MikroScribe-3D, представляющий собой небольшое

манипуляторное устройство, подключаемое к компьютеру через последовательный порт. Скорость передачи данных может достигать 38 Кбит/с, но реально она определяется пропускной способностью порта используемой машины. MikroScribe-3D регистрирует координаты с точностью 0,38 мм. Ввод данных осуществляется по нажатию управляющей ножной педали, функции которой программируются. Среди технических характеристик MikroScribe-3D интересно отметить его разрешающую способность - 0,13 мм, диаметр рабочего пространства - 1,27 м, частоту сканирования - 1000 точек в секунду. Стоимость базовой версии MikroScribe-3D составляет 2995 долл. Immersion выпускает две модификации дигитайзера: с повышенной до 0,23 мм точностью (MikroScribe-3DX, 3495 долл.) и с увеличенным до 1,67 м радиусом рабочей области (MikroScribe-3DL, 4495 долл.) [4].

В самостоятельную группу контактных автоматизированных устройств исторически выделились координатно-измерительные машины. Дискретность измерения линейных перемещений составляет 1- 0,4 мкм, угловых - 1". Величина рабочего пространства составляет: 0,4-2,5 м. Точность измерений (по нормам СММА)  $G = 3 + 0,7 L/250$  мкм. Быстродействие - 50 - 100 точек в секунду. Стоимость КИМ составляет 30 - 80 тыс. долл. в зависимости от модификации.

Более перспективными являются технологии бесконтактного сканирования, основанные на использовании особенностей различных волновых процессов преобразования сигналов.

Высокоскоростная лазерная сканерная система Replika разработанная 3D Skanners Ltd. при быстродействии 14000 точек в секунду обеспечивает высокую точность - 50 мкм. Пространство оцифровки подобных систем может составлять 1200 x 1200 x 1000 мм, а их стоимость 5 - 30 тыс. долл.

В фотограмметрии реализован модуль, состоящий из аппаратно-программных средств цифровой обработки, включающий телекамеры, источник освещения, стол позиционирования и управляющий комплекс. Система обработки видеоинформации позволяет вводить изображение с одной из трех телекамер. Изображение в системе представляется дискретной матрицей размером 256 x 256 или 512 x 256 элементов. Количество пространственных отсчетов по координатам определяет точность линейных измерений, которая достигает 0,25 и 0,5 % по осям x и y соответственно [5]. Следует отметить, что точность можно повысить, например, за счет дополнительной обработки линейных распределений яркости при условии выбора оптимального освещения или используя прецизионные перемещения стола позиционирования и камеру с трансфокатором. Стоимость видеосистем составляет 800 - 10000 долл.

В устройствах акустического ввода координат используется возможность измерения временных интервалов при прохождении фронта звуковой волны от источника звука до приемника. Временное запаздывание преобразуется в числовую величину, пропорциональную расстоянию, пройденному акустической волной. Акустические системы обладают точностью всего около 1 - 2 мм и подвержены помехам, которые вызваны акустической неоднородностью среды, отражением сигналов от посторонних предметов, попадающих в поле акустической волны, промышленным помехам и др. [6].

Достигнутый технический уровень устройств считывания трехмерных объектов на основе электромагнитного принципа характеризуется следующими основными техническими показателями: размер поля считывания 280 x 280, 1520 x 1120 мм; разрешающая способность 0,025 мм; точность считывания координат 0,01 мм; скорость преобразования координат 200 точек в секунду [6].

## Функциональный анализ технологии рекурсивного копирования

Функциональная модель системы рекурсивного копирования нерегулярных поверхностей представляет собой организованный набор поэтапно проводимых действий по преобразованию информационной модели заказа в реальное изделие (или новое качество изделия) (рис. 2): информационное описание объекта производства (оцифровка); хранение и поиск информации; компьютерное проектное моделирование; формообразование физического объекта на основе компьютерной модели (быстрое прототипирование).

Основной объем действий реализуется в модуле обработки и управления - функциональном инварианте системы. Согласно экспертной оценке, интеграция в систему модуля трехмерного сканирования повысит эффективность компактной производственной системы примерно на 1/3. Во столько же оценивается экспертами и его функциональная значимость для системы в целом. Для достижения такого результата необходимо при выборе базового варианта сканирующей системы обеспечить выполнение принципа функциональной достаточности компонентов компактной системы рекурсивного копирования и самого модуля трехмерного сканирования:

$$L_f = [Lf] \Rightarrow L_3 = L_{3opt} \quad (1),$$

а также принципа оптимального соотношения затрат на инвариант и адаптер в соответствии с их функциональной значимостью

$$\frac{L_3(Inv)}{L_3(Inv)} = \frac{RF_{inv}}{RF_{adp}} \quad (2).$$

Подставляя в последнее соотношение численные значения получаем приемлемый уровень затрат на адаптивную часть в долларовом выражении.

$$\frac{10000}{X} = \frac{1}{0,3} \Rightarrow X = 3000 \quad (3).$$

Анализируя ранее приведенные функционально-стоимостные параметры сканерных систем, необходимо отметить, что координатно-измерительные машины и лазерные сканирующие системы имеют критические функциональные показатели, обеспечение которых связано с повышенным уровнем затрат, что и подтверждается высокой стоимостью таких систем. Принципу функциональной достаточности отвечают ручные дигитайзеры, но конструктивная реализация точной механики этих систем ведет к увеличению их стоимости, которая значительно превышает стоимость функционального инварианта системы рекурсивного копирования. А это противоречит второму принципу. Функциональные показатели электромагнитных и акустических систем не удовлетворяют минимально необходимым значениям для достижения целей создания системы рекурсивного копирования.

Принципам создания компактной производственной системы отвечают оптические системы, основанные на видеосъемке, которые при относительно малой стоимости обеспечивают достаточный уровень точности оцифровки и высокую производительность процесса.

Конфигурация системы видеосъемки включает видеокамеру, координатный стол, имеющий возможность поворота в горизонтальной плоскости и проектор, оснащенный слайдом с изображением координатной сетки.

Функциональная схема трехмерного сканирования включает набор операций задания взаимного расположения компонентов данной системы, участвующих в построении анализируемой сцены и регистрации отраженного от нее светового излучения.

Технология сканирования пространственного объекта предусматривает выполнение следующих действий (рис. 3). На поворотный стол 1 устанавливают объект сканирования 2. Проектор 3 располагают так, что-

бы его оптическая ось была параллельна горизонтальной плоскости. В проектор вставляют слайд 4 с изображением сетки с равноотстоящими узлами, в результате проецирования которой в пространстве образуются световые плоскости. С целью упрощения идентификации точек сопряжения сторон объекта и повышения точности расчетов вертикально натягивают три нити 5. Наклонно устанавливают видеокамеру 6 и ориентируют ее в направлении сканируемого объекта. Включение видеокамеры позволяет регистрировать изображение одной из сторон сканируемого объекта, которое строится прямолинейными лучами, направленными от точек пространственного объекта к центру проекции как следы этих лучей на плоскости. Четыре центральных проекции объекта, регистрируемые видеокамерой в результате последовательных поворотов координатного стола на угол, кратный  $90^0$ , содержат необходимую для формирования объемной цифровой модели полноту информации.

Импортированное в компьютер видеоизображение трехмерной сцены обладает высокой информационной избыточностью, понижение которой обеспечивается регистрацией разнородной интенсивности излучения световых волн, отражающихся от объекта в результате проецирования на него линий слайда. Изображение сторон в данном случае представляется чередованием светлых и темных полос (уровней), имеющих свое постоянное значение по оси координат.

Вектор  $\bar{R}_s$ , задающий ориентацию видеокамеры в выбранной пространственной системе координат, определяется модулем  $R$  и величинами углов  $\mu$ ,  $\omega$  (рис. 4). Система координат видеокамеры определяется матрицей ориентирования, параметрами которой являются направляющие косинусы.

Задача цифровой идентификации дискретных элементов, принадлежащих поверхности сканируемого объекта по плоским изображениям последнего решается в векторной форме путем выражения координат век-

торов, определяющих ориентацию элементов, принадлежащих поверхности объекта в базисе выбранной системы координат через координаты векторов их центральных проекций. Результаты этого преобразования определенным образом организуются и формируют объемную цифровую модель пространственно-сложного объекта, являющуюся априорной информацией для компьютерного проектного моделирования, а также составляющую компонент базы графических данных.

Полученная объемная цифровая модель подвергается избирательному преобразованию с помощью функций компьютерного моделирования (избирательному масштабированию, отсечению, комбинаторному интегрированию фрагментов базы графических данных и др.). В результате проектирования получается компьютерная модель, несущая полную геометрическую информацию для изготовления нового реального физического объекта.

### **Обсуждение результатов**

Исследование функционально-стоимостных параметров сканирующих систем и их сравнительный анализ с учетом принципов обеспечения компактности производственной системы позволили выбрать относительно недорогую видеосистему в качестве базового варианта для реализации трехмерного сканирования. Добавление автоматического модуля трехмерного сканирования преобразует производственную систему быстрого прототипирования в компактную систему рекурсивного копирования нерегулярных поверхностей (рис. 5). Внедрение такой системы повысит эффективность формообразования нерегулярных объектов.

### **Выводы**

Предлагаемое структурно-технологическое решение трехмерного сканирования открывает возможности использования приемов рекурсии в решении практических производственных задач, а также способствует формированию базы графических данных, трансформационные преобразования элементов которой в значительной мере интенсифицируют конструкторско-технологическую подготовку производства новой промышлен-

ной продукции. Компактная система рекурсивного копирования нерегулярных поверхностей, включающая модуль трехмерного сканирования, обеспечивает автоматический ввод и преобразование потока информации, сопровождающего создание изделий от начала разработки до их изготовления.

### **Обозначения**

$\bar{R}_s$  - вектор, задающий ориентацию передней узловой точки регистрирующей камеры;  $\mu, \omega, R$  - параметры, определяющие вектор  $\bar{R}_s$ ;  $L_f$  - уровень исполнения функций;  $L_3(\text{Inv}), L_3(\text{adp})$  - уровень затрат, соответственно на инвариантную и адаптивную части компактной системы;  $R F_{\text{inv}}, R F_{\text{adp}}$  - важность функций, соответственно инвариантной и адаптивной части.

## Литература

1. **Полозков Ю.В., Свирский Д.Н.** Концепция компактной системы рекурсивного копирования скульптурных поверхностей. //Сб. науч. трудов ВГТУ. - Витебск: ВГТУ, 1998, с.233 - 237.
2. **Свирский Д.Н.** О специфике проектирования компактных производственных систем. //Сб. науч. трудов ВГТУ. - Витебск: ВГТУ, 1998, с.215 - 219.
3. **Полозков Ю.В., Ракович А. Г., Свирский Д. Н.** Практические аспекты обработки изображений в компактных системах информационного копирования нерегулярных трехмерных объектов. //Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях. - Мн: ИТК НАН Беларуси, 1998, т. 2, с.86-94.
4. **Иванов Н.** Трехмерный дигитайзер от Immersion. //Компьютер пресс., 1997, №2, с.38.
5. **Володин Е.С., Гуськов А.В. и др.** Применение многофункционального измерительного комплекса в гибких производственных системах // Измерительная техника, 1990, №9, с.19 - 21.
6. **Самошкин Н.А.** Автоматизация ввода-вывода и обработки данных на основе рекурсивного представления информации. - Мн.: Навука і тэхніка, 1996.

**Polozkov Y.V., Svirsky D.N.**

**The 3-dimensions scanning technology and equipment in the compact rapid prototyping system.**

The variant of effective 3D-scanning module and technology on the video recording basis are shown. The example of compact rapid prototyping system with 3D-scanning module is considered.