

Об одном подходе к автоматизации процесса изготовления ювелирных изделий

Г.Н. Верхотурова
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: verhoturova.gn@yandex.ru

А.В. Киселёв
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: andrey.kise15@yandex.ru

Аннотация¹

Проблемой, рассматриваемой в данной статье, является разработка программного обеспечения, которое автоматизирует процесс размещения объектов на ювелирном фрезерном станке с числовым программным управлением, что позволяет уменьшить время создания прототипа и количество отходов при изготовлении.

В статье отражены результаты анализа рынка программных средств для моделирования размещения моделей прототипов ювелирных изделий, предложен подход, позволяющий решить данную задачу сведением к двумерному раскрою.

Введение

Технологии прототипирования и прямого безинструментального производства на передовых западных предприятиях уже несколько десятилетий являются обязательным этапом в процессе разработки и подготовки производства любого нового изделия практически во всех отраслях. Они позволяют не только оценить внешний вид разрабатываемого изделия, но и проверить элементы конструкции, ее эргономику, собираемость, провести необходимые испытания, изготовить мастер-модель для последующего литья и многое другое. При использовании этих технологий практически исключается длительный и трудоемкий этап изготовления опытных образцов. Мировая практика использования этих технологий доказывает, что прототипирование изделий на стадии проектирования позволяет в 2 – 4 раза сократить сроки разработки и

технической подготовки производства новой продукции. [1]

Если необходимо создать прототип изделия или изготовить металлическую пресс форму, то лучше всего прибегнуть к технологиям быстрого прототипирования. Одной из таких технологий является 3D - фрезеровка.

Фрезеровка, как способ обработки материала, известна с начала XIX-го века. В третьем тысячелетии технология развилась настолько, что стала одним из основных способов создания 3D-моделей. Для 3D-фрезерования используется фрезерный станок с числовым программным управлением (ЧПУ), который позволяет обеспечить высокую точность изготавливаемых объектов из любых материалов. При этом 3D-фрезерование проходит быстро и качественно.

Этапы изготовления ювелирного изделия

Конечно же, технический прогресс коснулся и ювелирной промышленности. 3D-фрезеровка широко используется при производстве ювелирных изделий. Изготовление любого ювелирного изделия начинается, в первую очередь, с идеи. И эта идея, сначала, должна воплотиться в эскизе, после – в макете изделия. Именно этим и занимается 3D-моделирование и 3D-фрезеровка ювелирных изделий.

Одним из первых этапов изготовления ювелирных изделий является создание 3D-модели соответствующего изделия, которая необходима для последующего вырезания прототипа.

Восковые прототипы изготавливает специализированный станок 3D-фрезеровки с ЧПУ из бруска воска, определенного размера. Для этого программе станка подается информация о размещении моделей на бруске. Данная программа рассчитывает движение иглы, которая отрезает от бруска все лишнее.

Труды Седьмой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-30 мая, Уфа-Ставрополь, Ханты-Мансийск, Россия, 2019

Полученный таким образом прототип заливается специальным огнеупорным гипсом. Затем при этом восковый прототип расплавляется. В результате получаем гипсовую форму, в которую затем заливается золото, серебро или другой драгоценный металл. При этом получается изделие из драгоценного металла, соответствующее по форме восковой модели.

Процесс изготовления можно представить следующей схемой (Рис. 1):



Рис. 1. Схема изготовления ювелирных изделий

Актуальной задачей является автоматизация этапа «Размещение объектов на бруске» для того, чтобы повысить скорость изготовления прототипа, а также сократить затраты на использование материала.

Обзор существующих программных средств для размещения трехмерных объектов

Проведенный анализ программных средства для размещения трехмерных объектов позволил сделать следующие выводы:

большинство программных продуктов предназначены для загрузки грузовых отсеков контейнерами, т.е. позволяют размещение стандартных объектов таких как параллелепипеды и цилиндры, а также не умеют работать с форматом stl, который широко используется в ювелирных станках. Исключение составляет лишь пакет Magica 13, который является очень дорогим.

Алгоритм размещения трехмерных объектов

В данной работе предлагается подход, позволяющий размещение трехмерных объектов свести к задаче раскроя прямоугольной области на детали произвольной формы, предварительно выполнив три подготовительных этапа:

- Нахождение параллелепипедной оболочки.
- Нахождение минимальной выпуклой оболочки (МВО).
- Нахождение эквидистанты к МВО.

Найденная параллелепипедная оболочка позволяет решить две задачи:

- Нахождение необходимой высоты блока из которого будет вырезаться трехмерный объект.
- Нахождение центра объекта.

Для нахождения параллелепипедной оболочки достаточно найти две точки из восьми – точку, которая представляет собой максимальные координаты по X, Y, Z, которые содержат в себе точки модели, а также точку, которая содержит минимальные координаты по X, Y, Z. Остальные 6 точек представляют собой комбинацию координат максимальной и минимальной точки (Рис. 2).

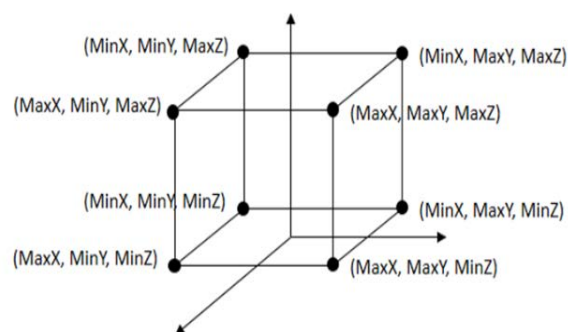


Рис. 2. Параллелепипедная оболочка

Пусть на плоскости задано конечное множество точек A. Оболочкой этого множества называется любая замкнутая линия H без самопересечений такая, что все точки из A лежат внутри этой кривой. Если кривая H является выпуклой (например, любая касательная к этой кривой не пересекает ее больше ни в одной точке), то соответствующая оболочка также называется выпуклой. Наконец, минимальной выпуклой оболочкой (далее кратко МВО) называется выпуклая оболочка минимальной длины (минимального периметра) (Рис. 3).

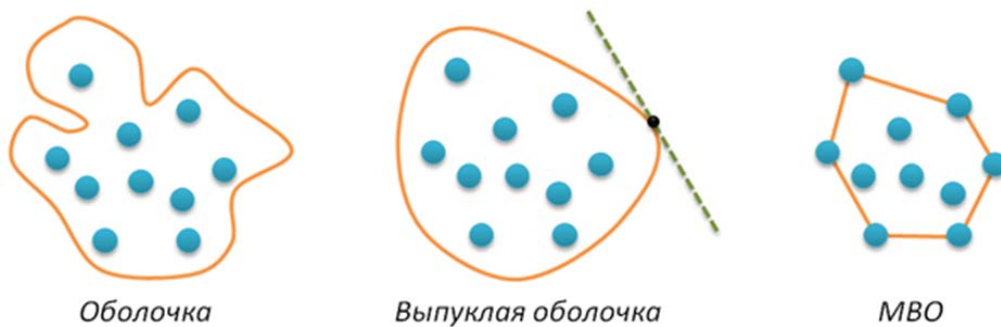


Рис. 3. Минимальная выпуклая оболочка

Так как все точки модели лежат в трехмерном пространстве, а выпуклая оболочка находится для двухмерного пространства, то перед тем как находить выпуклую оболочку необходимо привести трехмерные координаты точек к двумерным путем проецирования их на плоскость XOY. [2]

Существует множество алгоритмов нахождения минимальной выпуклой оболочкой.

Рассмотрим некоторые из них.

- Алгоритм Джарвиса

По-другому "Gift wrapping algorithm" (Заворачивание подарка). Он заключается в том, что мы ищем выпуклую оболочку последовательно, против часовой стрелки, начиная с определенной точки.

- Алгоритм Грэхема

Алгоритм заключается в том, что мы ищем точки оболочки последовательно, используя стек.

- Алгоритм Эндрю

Алгоритм, очень похожий на алгоритм Грэхема. Он заключается в том, что мы находим самую левую и самую правую точки, ищем для точек над и под этой прямой выпуклую оболочку Грэхема - для них начальные точки будут лежать на $\pm\text{inf}$, а сортировка по углу относительно далекой точки аналогична сортировке по координате; после этого объединяем две оболочки в одну.

- Алгоритм Чена

Является комбинацией двух алгоритмов - Джарвиса и Грэхема. Недостатком Грэхема является необходимость сортировки всех точек по полярному углу, что занимает достаточно много времени $O(n \log n)$. Джарвис требует перебора всех точек для каждой из k точек оболочки, что в худшем случае занимает $O(n^2)$.

Для примера рассмотрим алгоритм Джарвиса.

- Возьмем точку p_0 нашего множества с самой маленькой координатой Y (если таких несколько, берем самую правую из них). Добавляем ее в ответ.

- На каждом следующем шаге для последнего добавленного p_i ищем p_{i+1} среди всех нерассмотренных точек и p_0 с максимальным полярным углом относительно p_i (Если углы равны, надо сравнивать по расстоянию).
- Добавляем p_{i+1} в ответ.
- Если $p_{i+1} = p_0$, заканчиваем алгоритм.

Нахождение МВО необходимо для формирования эквидистанты – множества точек МВО, удаленных на одинаковое расстояние.

Для нахождения эквидистанты необходимо сначала подготовить деталь:

- Найти центр фигуры,
- Совместить центр фигуры с центром системы координат.

Для того, чтобы найти центр фигуры, необходимо найти центр параллелепipedной оболочки этой фигуры, которая была найдена пару этапов назад.

Чтобы совместить центр фигуры с центром системы координат необходимо из каждой точки данной фигуры вычесть координаты центра фигуры.

После этого можно приступить к нахождению эквидистанты.

Пусть Pnt – точка МВО, Ecv – эквидистанта данной точки, а $Dist$ – расстояние, на которое Ecv удалена от Pnt , тогда Ecv находится с помощью формул 1 и 2:

$$Ecv.X = Pnt.X + \frac{Dist * Pnt.X}{\sqrt{Pnt.X^2 + Pnt.Y^2}} \quad (1)$$

$$Ecv.Y = Pnt.Y + \frac{Dist * Pnt.Y}{\sqrt{Pnt.X^2 + Pnt.Y^2}} \quad (2)$$

Визуальное представление эквидистанты (Рис. 4):

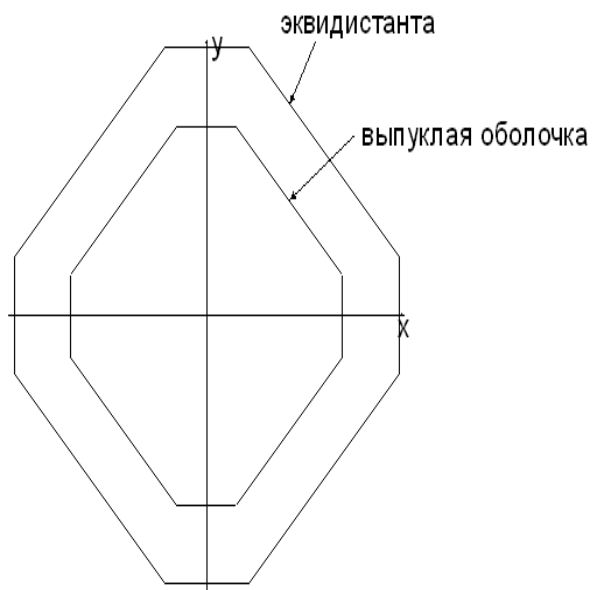


Рис. 4. Эквидистанта

Следующим этапом является размещение эквидистант выпуклых оболочек в прямоугольной области. При этом эквидистанты и область размещения представляются в виде матрицы.

Пусть $matrix$ – матрица эквидистант, а $C[i,j]$ – точка с координатами i,j , тогда алгоритм нахождения матрицы можно представить в виде (Рис. 5):

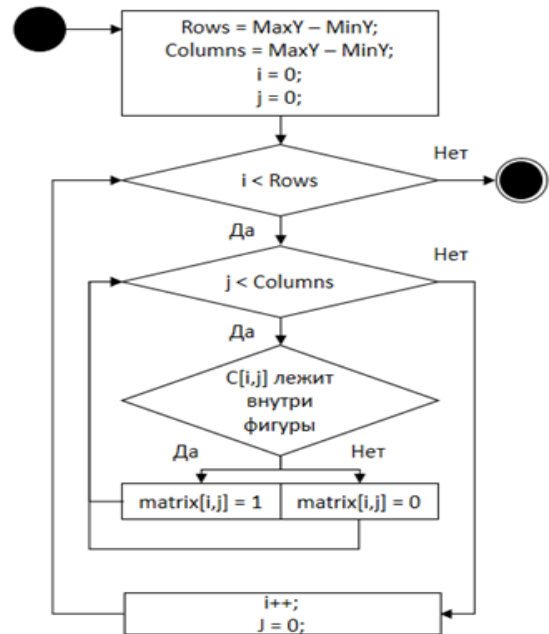


Рис. 5. Алгоритм нахождения матрицы эквидистанты

Обозначим:

- $Model[modX, modY]$ – матрица, представляющая эквидистанту объекта;
- $Block[blX, blY]$ – матрица, представляющая брусок для размещения;
- dX, dY – координаты левого верхнего угла объекта при размещении;
- $Rest$ – количество столбцов матрицы $Block$ полностью состоящих из 0;
- $Alpha$ – заданный угол поворота фигуры вокруг оси Z за одну итерацию алгоритма;
- $Angle$ – угол поворота объекта.

Тогда алгоритм размещения принимает следующий вид (Рис.6):

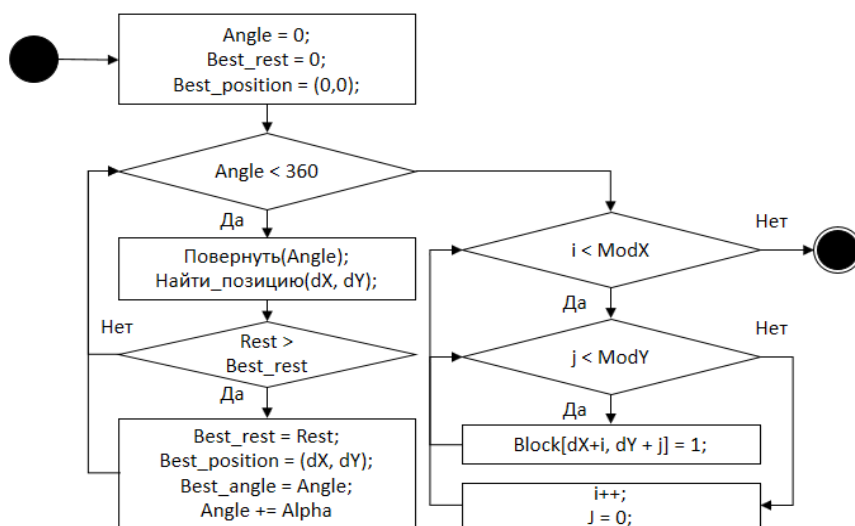


Рис. 6. Алгоритм раскроя двумерной области на объекты неопределенной формы

Задача размещения представляет собой поиск таких координат dX, dY, что:

- Все элементы матрицы Block от Block[dX, dY] до Block[dX+modX, dY+modY] равны 0.

- Rest является наибольшим.

При этом для нахождения позиции dX, dY можно воспользоваться жадным алгоритмом (Рис. 7):

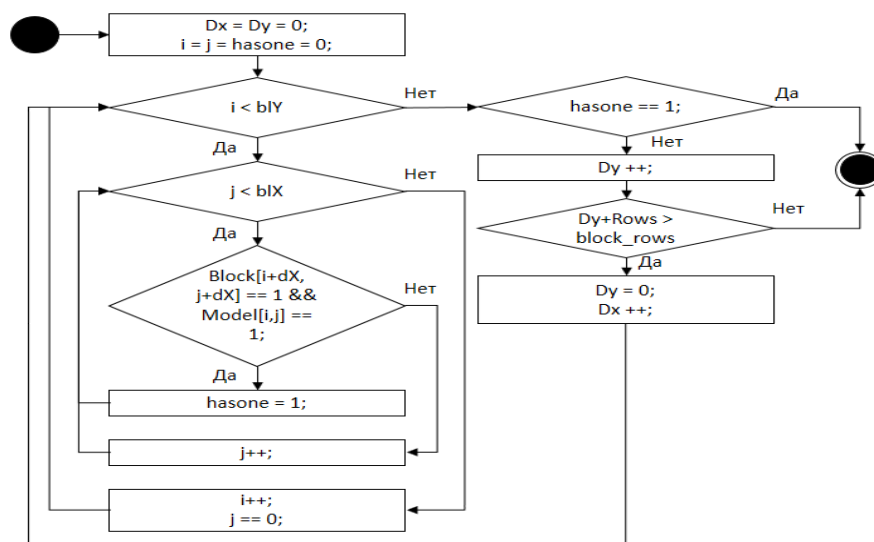


Рис. 7. Поиск координат размещения объекта

Поворот модели вокруг оси Z представляет собой поворот всех точек модели вокруг оси Z, используя формулы (3) и (4):

$$C.X = C.X * \cos(\text{Angle}) - C.Y * \sin(\text{Angle}) \quad (3)$$

$$C.Y = C.X * \sin(\text{Angle}) + C.Y * \cos(\text{Angle}) \quad (4)$$

Алгоритм нахождения Rest – размера неиспользованного материала представляет собой следующую блок схему (Рис. 8):

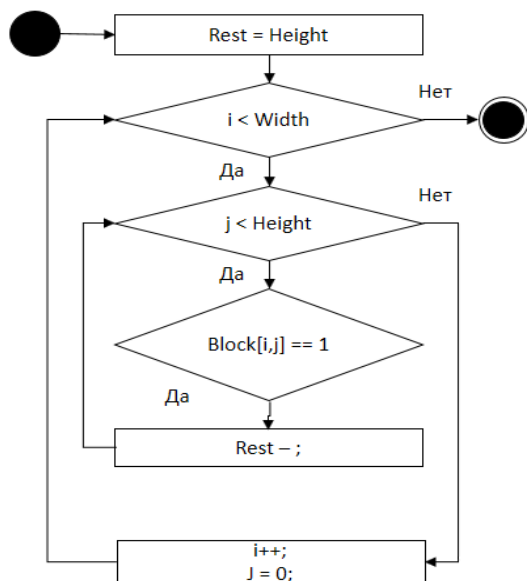


Рис. 8. Алгоритм нахождения расстояния неиспользованной области

Для повышения точности размещения следует поворачивать объект размещения на угол Alpha, пока $\text{Angle} < 360$. Чем меньше Alpha, тем точность размещения будет больше.

Данный алгоритм позволяет найти локально оптимальное размещение 3D-объектов с минимальным остаточным материалом, а также узнать необходимую высоту блока для размещения всех объектов.

Результаты тестирования

Рассмотренные алгоритмы были реализованы с использованием языка программирования C#.

Тестирование разработанного программного обеспечения проводилось на различных исходных моделях.

Каждая из моделей размещения представляет собой совокупность мешей – треугольников, образующих трехмерный объект.

В качестве объектов размещения использовались:

- Модель вазы – 1240 мешей (Рис. 9),

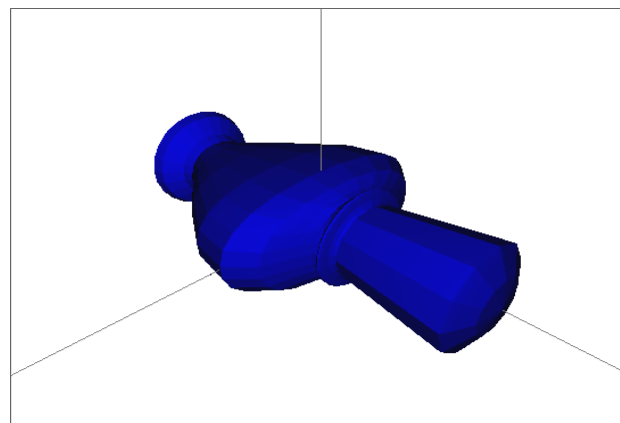


Рис. 9. Модель вазы

- Модель кольца – 27684 мешей (Рис. 10),

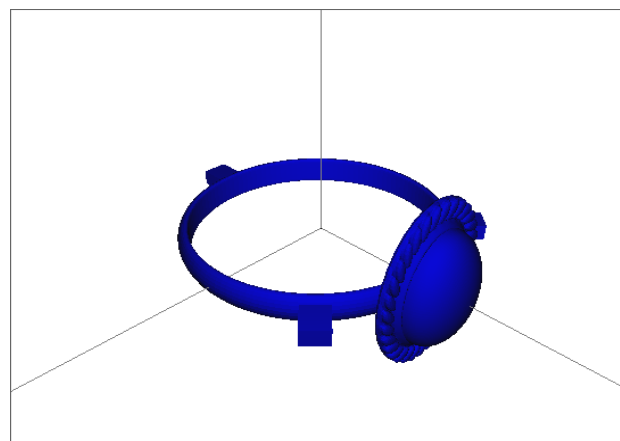


Рис. 10. Модель кольца

- Модель сферы – 228 мешей (Рис. 11),

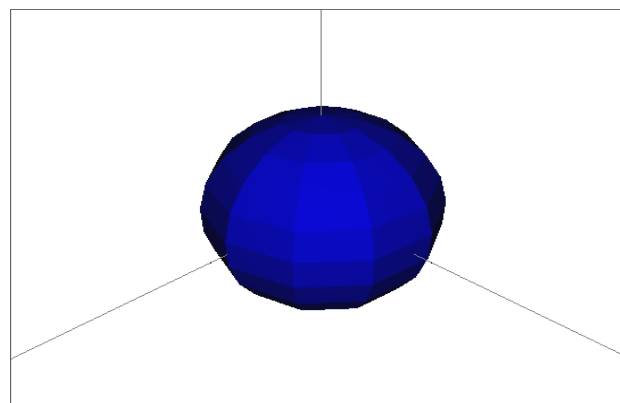


Рис. 11. Модель сферы

Каждая из моделей размещалась в 3, 6, 9 и 12 экземплярах.

Результаты работы программы представлены в таблице 1. Данные показывают время размещения в мс.

Таблица 1. Время работы алгоритма в миллисекундах

Количество мешей	Количество моделей	Время нахождения решения(мс) при поворотах в градусах						
		0	1	15	30	60	90	180
Сфера - 228	3	14	1643	111	58	31	24	13
	6	33	5952	405	204	123	75	42
	9	44	9967	702	337	182	124	69
	12	87	25073	1719	847	425	279	176
Ваза - 1240	3	53	15347	1152	509	300	173	76
	6	120	52201	4072	1784	863	560	186
	9	205	150851	6838	3280	1631	1017	337
	12	303	326626	12679	5982	2962	1854	559
Кольцо - 27684	3	101	3057	321	214	186	153	104
	6	218	6234	713	438	364	306	223
	9	292	9547	1006	680	537	461	339
	12	397	14327	1470	988	740	638	463

Для демонстрации карты размещения модели вазы, сферы и кольца были размещены в двух экземплярах в области размером 150x150 (Рис. 12).



Рис. 12. Карта размещения

Список используемых источников

1. Быстрое прототипирование // CAD/CAM Центр
URL: <http://prototip.kai.ru/>
2. Построение минимальных выпуклых оболочек // Хабр
URL: <https://habr.com/post/144921>

Заключение

Результаты прогонов показали, что время размещения зависит от количества объектов, их формы, размера и угла поворота. Однако результаты больше секунды были получены начиная с поворота в 30 градусов 6 моделей наибольшей площади, что позволяет использовать разработанный программный продукт для решения NP-трудной задачи.

Благодарности

Оргкомитет благодарит РФФИ за содействие в проведении конференции.