
УДК 515.2

**Исследование алгоритмов использования рецепторных
геометрических моделей в задачах телесной трассировки
авиационной техники**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

Ньи Ньи Хтун*, Чжо Тайк, Маркин Л.В.*****

**e-mail:nyinyihtun@live.com*

***e-mail:kyawhtike85@gmail.com*

****e-mail:markinl@list.ru*

Аннотация

В статье рассмотрены геометрические аспекты прокладки соединительных трасс (пневмо- и гидросетей, электрожгутов) при компоновке авиационной техники. Особенностью рассматриваемой задачи является то, что размеры компонуемых трасс сопоставимы с размерами уже скомпонованных объектов (такая ситуация называется телесной трассировкой). Кроме того, к проектируемой трассе предъявляются дополнительные требования минимальной гладкости, что дополнительно усложняет задачу проектирования трассы. Для решения поставленной задачи предлагается использовать дискретные методы описания пространства компоновки (рецепторные модели), на основании которых сформирован алгоритм проектирования таких трасс. Проведение сравнение разработанного метода с существующими алгоритмами дискретной трассировки.

Ключевые слова: проектирование, трассировка, рецепторные модели, телесная трассировка, каналовые поверхности, обход препятствий, сглаживание траекторий

Постановка задачи

При автоматизации проектирования любой техники на результат проектирования оказывает существенное влияние качество компоновки. Исследование методов и моделей автоматизированной компоновки проводятся достаточно давно [1]. При этом одним из аспектов компоновки является решение задач трассировки, т.е. прокладывания коммуникаций между уже размещенными объектами (рисунок 1). Такие задачи, связанные, например, с задачами прокладки электрожгутов между компоновемыми объектами, являются достаточно трудноформализуемыми и сложными для решения из-за присущей им многоэкстемальной природы [2].

Особым и значительно более сложным видом трассировки является так называемая «телесная» трассировка, т.е. такой случай, когда размеры (соединительных элементов) трассы сопоставимы с размерами компоновемых элементов. На практике, это проектирование трубопроводов, воздухопроводов и других элементов прежде всего, авиационной техники, а также и других транспортных систем.

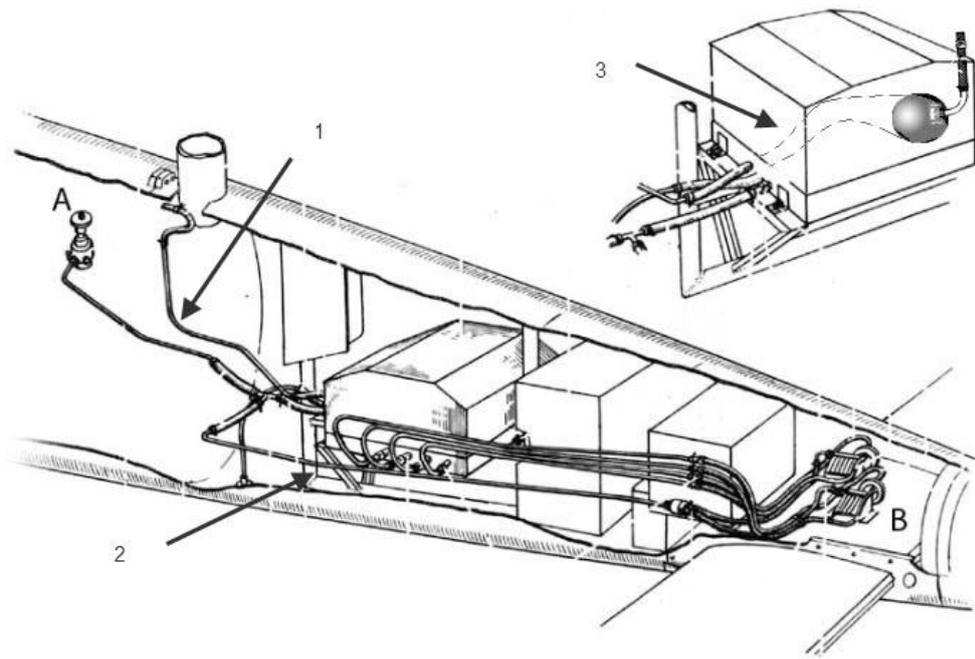


Рисунок 1 – Проведение коммуникаций между заданными точками пространства с учетом областей запрета в фюзеляже самолета

С математической точки зрения задача компоновки авиационной техники (впрочем, как и любой другой) может быть сформулирована как оптимизационная задача следующего вида.

Пусть имеется N компокуемых объектов T_i ($i=1, \dots, N$) и область размещения Ω . Требуется разместить эти объекты с учетом заданных ограничений в области Ω таким образом, чтобы функция цели компоновки $\Phi(X)$ достигала экстремума, т.е. определить

$$\text{Extr } \Phi(X) \text{ при } X \subset \Omega$$

где X - некоторая переменная, определяющая параметры размещения.

Таким образом, математическая постановка задачи размещения включает 3 компонента:

- 1) Выбор функции цели $\Phi (X)$.
- 2) Выбор переменной X .
- 3) Выбор и формализация ограничений.

Основным геометрическим условием рационального размещения объектов является условие рационального размещения в области Ω некоторого множества компонентуемых объектов $\{T_i\}_1^n$ (где n достаточно велико) или наибольшего количества множеств объектов $\{\{T_i\}_1^n\}_1^m$ (где m достаточно велико). В данном случае приходится говорить о рациональном, а не об оптимальном размещении объектов, т.к. в силу астрономического количества вариантов компоновки (ее многовариантности) достижение глобального экстремума функции цели компоновки практически исключается.

Очевидно, что в геометрическом плане основным критерием оптимизации размещения является оптимизация коэффициента заполнения пространства K_V . Коэффициент K_V (иногда его называют коэффициентом плотности компоновки) представляет собой отношение

$$K_V = \frac{\sum_{i=1}^n V_{к.о.}}{V_{отс.}}$$

где $\sum_{i=1}^n V_{к.о.}$ - сумма объемов n скомпонованных объектов,

$V_{отс.}$ - объем отсека, в котором производится компоновка.

Условие максимальной плотности компоновки записывается в виде выражения

$$\begin{aligned} & Extr V(X) \text{ при } X \subset \Omega \\ & K_V \rightarrow 1 \end{aligned} \tag{1}$$

Выражение (1) представляет собой пожелание приблизить объем скомпонованных объектов к общему объему отсека, тем не менее, не является самым удобным для проведения дальнейших компоновочных расчетов. В нашем конкретном случае (телесной трассировки) смысл выражения (1) означает пожелание провести соединительную трассу таким образом, чтобы она не только позволила выполнять свои основные функции (передачу необходимого потока газа, жидкости, тепла и т.п.) между двумя заданными точками пространства, но и обладала следующими дополнительными свойствами:

- обеспечивала бы условия взаимного непересечения с уже скомпонованными объектами и другими областями запрета;

- имела бы минимально возможную в данных условиях протяженность трассы (что снизит ее гидравлическое сопротивление и массу);

- обеспечивала бы заданную конструктором плавность тока, что задается дополнительным техническим требованием – минимальной кривизной главной направляющей линии соединительной трассы.

Поэтому дальнейшей детализацией выражения (1), необходимой для оптимизации по K_V , является переход от минимизации по объему к минимизации по расстоянию между объектами с обязательным соблюдением вышеописанных дополнительных ограничений. Оптимизация по K_V достигается максимально компактным (в идеале - плотным) размещением компонуемых объектов, фундаментальное понятие которого введено Ю.Г. Стояном и Н.И.Гилем [3].

Метод решения задачи и принятые допущения

Общие вопросы проектирования каналовых поверхностей с точки зрения их

геометрических характеристик рассматривались в работах В.А.Осипова и его учеников [4].

Общие вопросы компоновки рассматривались в работах В.Л.Рвачева, Ю.Г.Стояна, Н.И.Гиля, В.Н.Гаврилова и их учеников. Вопросы трассировки исследовались в работах Аристовой И.В., Калинина Б.В. и ряда других отечественных и зарубежных авторов [5, 6].

Однако решение задачи телесной трассировки в вышеописанной постановке (т.е. с учетом требований компоновки и плавности) одновременной нам неизвестно. Принципиальным отличием в нашем подходе и подходе других исследователей является то, что если раньше канал проектировали по заданным инженерно-геометрическим характеристикам, а потом его уже размещали, то у нас наоборот – мы пытаемся спроектировать канал с заданными характеристиками, «вписанный» в уже существующую компоновку. Очевидно, что в нашей постановке задача не всегда имеет допустимые решения.

Для решения поставленной задачи нам кажется предпочтительным использование рецепторных моделей, дискретизирующих пространство. В основу рецепторного метода (известного также как «матричный», «бинарный», «перечисления элементов пространства» и т.д.) положено приближенное представление геометрического объекта в поле или пространстве рецепторов. Для плоского случая поле рецепторов представляет собой однородную прямоугольную сеть $m \times n$, каждая клетка которой рассматривается как отдельный рецептор, который может иметь два состояния – «0» или «1». Математически рецепторная геометрическая модель описывается множеством $A = \{a_{ij}\}$, где

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рецептор возбужден,} \\ 0, & \text{если рецептор не возбужден} \end{cases}$$

Рецептор считается невозбужденным, если через него не проходит граница объекта и он не принадлежит внутренней области (рисунок 2).

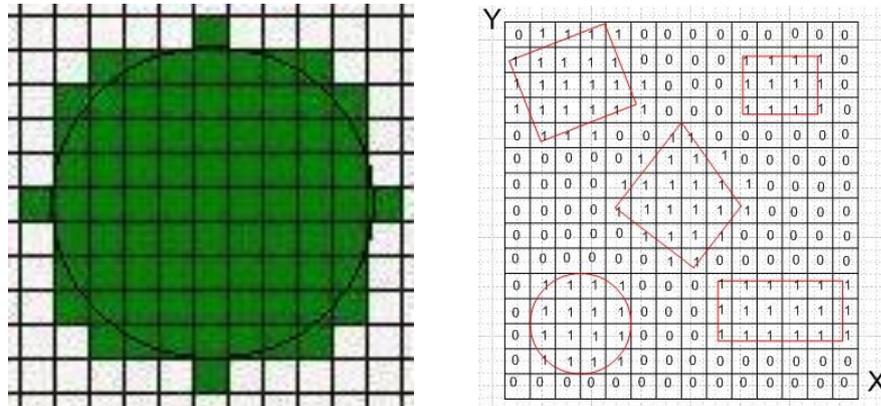


Рисунок 2 - Рецепторная модель 2D-тела

Трехмерные объекты описываются трехмерной матрицей $A = \{a_{i,j,k}\}$ размерностью $m \times n \times p$ (рисунок 3).

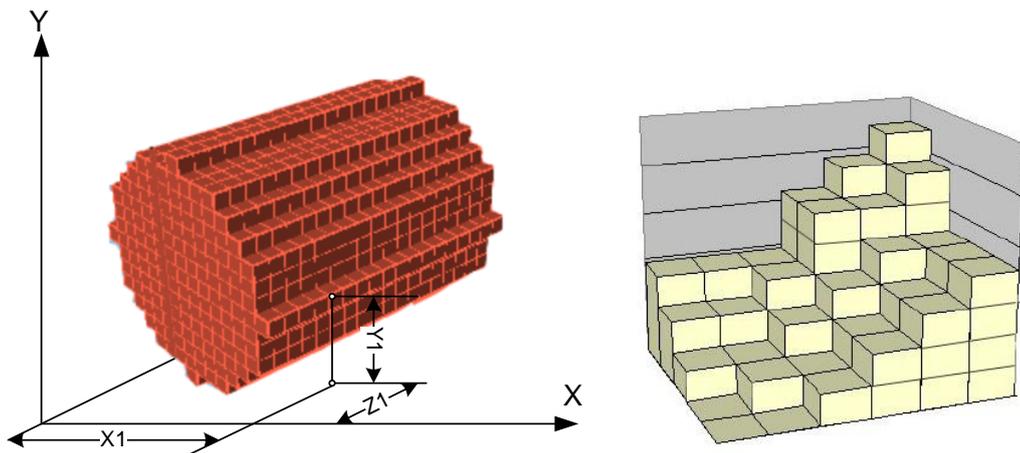


Рисунок 3 - Рецепторная модель 3D-тела

Существенной проблемой при решении задачи трассировки является обход препятствий, в качестве которых выступают уже скомпонованные объекты или коммуникации между ними. Большим преимуществом рецепторного подхода явля-

ется легкость обнаружения препятствия по коду рецептора (0 или 1). Наипростейшим подходом к проблеме является игнорирование препятствий до столкновения с ними. Такой алгоритм будет выглядеть примерно так: выбрать направление для движения к цели и, пока цель не достигнута и направление свободно для движения,

Очевидно, что точность описания геометрической формы объекта зависит от выбранной нами дискретности рецепторной матрицы. Такой метод геометрического моделирования был предложен в начале 70-х годов прошлого века белорусским ученым Зозулевичем Д.М. [7], но в те годы не получил распространения из ограниченных возможностей СВТ (прежде всего по памяти и быстродействию). Хотя им и коллективом его сотрудников и были решены этим методом отдельные прикладные задачи, на ЭВМ тех лет с 16-битной архитектурой и объемом оперативной памяти 32...128 килобайт было невозможно рассчитывать на эффективное использование рецепторных моделей.

Таким образом, для проектирования каналовых поверхностей между двумя объектами в авиационной технике необходимо смоделировать гладкий путь, учитывающий не только уже ранее скомпонованные объекты, но и обеспечивающий заданную плавность тока. Сложность решения этой задачи заключается в том, что при достаточно сложных геометрических формах размещенных объектов геометрическая форма коммуникаций окажется еще более сложной.

Подводя итог вышесказанному, нами предлагается использовать для решения поставленной задачи рецепторные геометрические модели, т.е. разбиение компоновочного пространства на отдельные области в виде параллелепипедов (рецепторы - по западной терминологии **Voxel**), для каждой из которых в памяти компьютера

присваивается значение «0» если она является свободной от размещенных объектов и доступна для размещения и «1» - если область уже занята размещенным объектом или коммуникацией к нему. Этот метод, сравнивая значения рецепторов, позволяет легко определять пересечение объектов.

Разработки и исследование алгоритмов телесной трассировки

Проиллюстрируем сначала решение поставленной задачи телесной трассировки для простоты в 2D (плоской) постановке.

Имеется прямоугольная область размерами $X \times Y$, в которой расположены области запрета. Задана точка входа A и точка выхода B канала (рисунок 4). Необходимо провести трассу между заданными начальной и конечной точками A и B .

Из рисунка 4 видно, что поскольку мы не наложили никаких ограничений на трассу, возможно достаточно много вариантов ее прохождения. Учитывая нашу транспортную специфику проектирования техники, очевидно, что из всех трасс на рисунке 4 лучше будет та, которая короче.

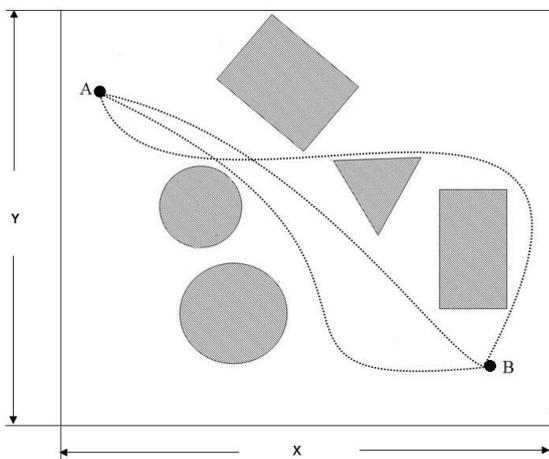
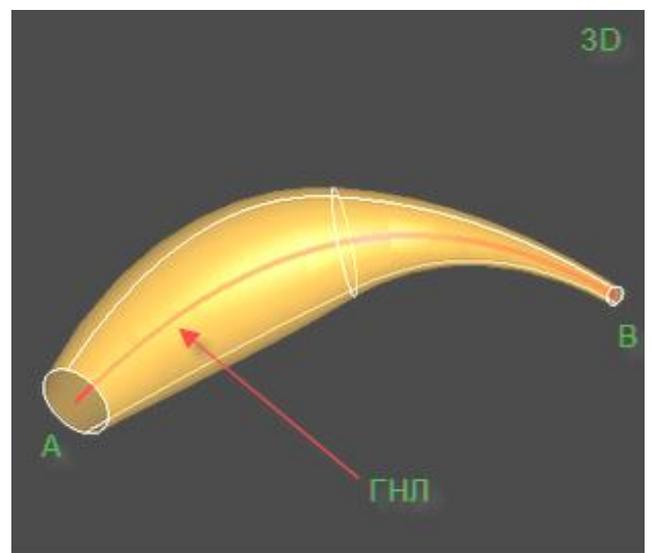
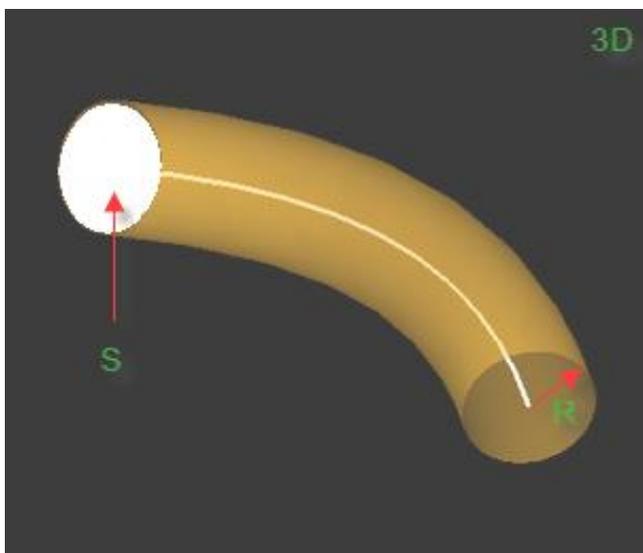


Рисунок 4 - Нахождение рационального пути между двумя конечными точками A и B в 2D постановке

Усложним задачу проектирования. Будем считать, что наша трасса должны быть не бесконечно тонкой, как на рисунке 4, и иметь вполне конкретные физические размеры, т.е. являться каналовым объектом. В простейшем случае это цилиндрический канал постоянного радиуса R (рисунок 5 a), в более сложном – канал переменного сечения (рисунок 5 b).

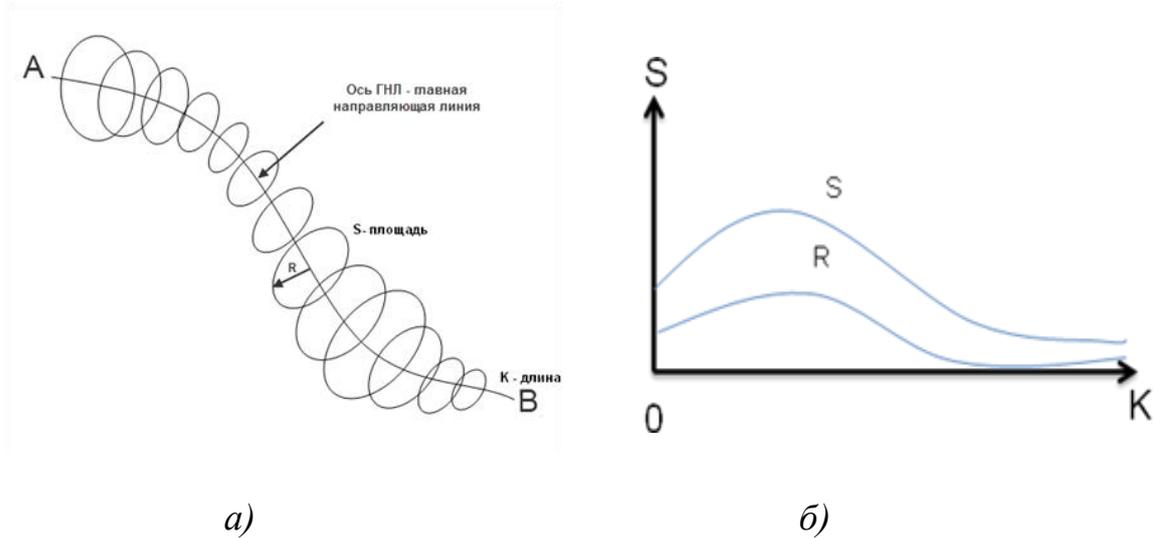
Известно, что положение канала в пространстве определяется, прежде всего, положением его линии тока, которая в геометрии называется главной направляющей (ГНЛ). Если канал постоянного сечения, как на рисунке 5 a , для его однозначного геометрического описания достаточно задания описания ГНЛ и значения радиуса R . Если же он переменного сечения, то необходима дополнительная информация о форме канала. Например, если он представляет собой в сечении круг переменного радиуса (рисунок 6 a), то это может быть закон изменения площади по длине ГНЛ (рисунок 6 b).



a)

б)

Рисунок 5 – Канал в 3D-варианте: а – постоянного радиуса; б – переменного сечения



a)

б)

Рисунок 6 – Задание формы канала переменного сечения: а – вид сечений по длине ГНЛ; б – задание функции площади сечения S и радиус круга R по длине ГНЛ

Разумеется, в практике проектирования авиационной техники встречаются и каналы более сложной геометрической формы, но мы остановимся на этом уровне сложности – в нашем исследовании наиболее сложный случай – канал с пространственной ГНЛ переменной площади сечения круглой формы.

Однако в нашем случае будет действовать еще одно ограничение - кривизна ГНЛ не должна быть меньше заданной. Очевидно, что ГНЛ, являясь кривой линией, в каждой точке имеет свой радиус кривизны R' (рисунок 7). Нужно, чтобы его значение было не меньше заданного конструктором значения R_{min} . Выполнение это условия необходимо для исключения ситуаций резкого изгиба трубопровода, что приводит к срыву потока, забивания трубопровода грязью.

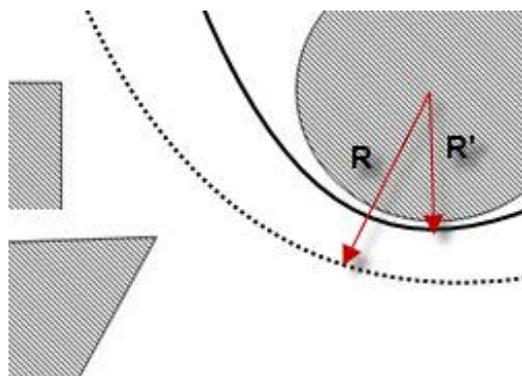


Рисунок 7 – Требование обеспечения минимального радиуса кривизны канала (в 2D постановке)

Еще одним дополнительным требованием к проектированию каналовой поверхности может быть не только обеспечение условия взаимного непересечения с уже скомпонованными объектами, но и обеспечения заданного минимального расстояния между ними, например для обеспечения требуемой тепло- или электроизоляции. Будем называть это расстояние δ – радиусом, который задается как условие проектирования – это минимальное расстояние от края трубопровода до размещенного объекта

По своей геометрической сущности рецепторный метод, который мы предполагаем использовать для решения поставленной задачи, является частным случаем метода аналитической аппроксимации объектов, который используются для описания трехмерных объектов, включающих сложные поверхности второго и более высоких порядков. Поскольку вычислительная обработка таких поверхностей затруднена, они аппроксимируются участками поверхностей более низкого порядка (плоскостями, цилиндрами и т.п.).

Рецепторный метод имеет как свои достоинства, так и недостатки. К очевидным недостаткам следует отнести дискретность модели и потребность в больших объемах памяти СВТ для своей реализации, но сейчас увеличение памяти СВТ до любых объемов не представляет сложности ни технической, ни экономической. Другой сложностью является то, рецепторная геометрическая модель (РГМ) никогда не является изначальной. Размещаемые и уже размещенные изделия описываются конструктором, как правило, параметрическими геометрическими моделями (т.е. задающими вид объекта и его параметры - сфера радиусом R , параллелепипед размерами $a \times b \times c$ и т.д.). Поэтому возникает необходимость в дополнительном программном модуле «Параметрическая модель» \leftrightarrow «Рецепторная модель». Но вопросы такого преобразования решены в работах Г.В.Корн и Ситу Лина [8, 9].

Безусловным же достоинством РГМ является уникальная легкость определения условия взаимного непересечения (УВН) уже размещенных объектов – если значение конкретного рецептора «0», то он доступен для размещения, если «1» - то он уже кем-то «занят». Именно эти причины побудили в последние годы интерес к РГМ как у нас, так и на Западе (там они называются «воксельными» - элемент объема – по аналогии с «пиксельными» - элементами плоскости).

Используемые в исследовании методы и алгоритмы

Рецепторный метод положен в основу геометрического моделирования (ГМ). Решения задачи трассировки обычно используются в качестве основы любой системы движения искусственного интеллекта «ИИ», и они несут ответственность

за нахождение рационального пути из одной точки к другой. Для реализации задачи трассировки были использованы следующие известные алгоритмы [10, 11]:

- Алгоритм Дейкстры
- Алгоритм A* «А звездочка»

Существенной проблемой при решении задачи трассировки является обход препятствий, в качестве которых выступают уже скомпонованные объекты или коммуникации между ними. Большим преимуществом рецепторного подхода является легкость обнаружения препятствия по коду рецептора (0 или 1). Наипростейшим подходом к проблеме является игнорирование препятствий до столкновения с ними. Такой алгоритм будет выглядеть примерно так: выбрать направление для движения к цели и, пока цель не достигнута и направление свободно для движения, по правилу - *двигаться туда* - Иначе - *выбрать другое направление в соответствии со стратегией обхода*.

В данной работе проанализированы различные стратегии обхода препятствий (эвристики), основанные как на случайном поиске, так и на алгоритмах искусственного интеллекта. Каждый из них имеет как свои ограничения, так и области предпочтительного применения. Примеры работы различных алгоритмов трассировки приведены на рисунке 8.

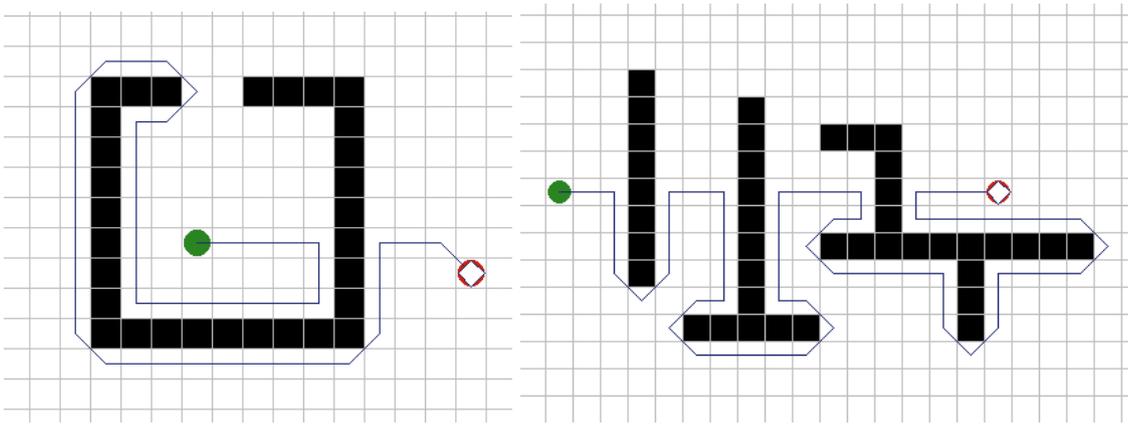


Рисунок 8 - Примеры трассировки при обходе различных препятствий (в 2D постановке)

Рецепторный алгоритм A^* обычно используется лишь для нахождения оптимального кратчайшего пути. Этот алгоритм гарантирует целостность и оптимальность, но такой путь не учитывает минимально допустимое расстояние до объектов размещения и требования к плавности трассы - она может проходить слишком близко к областям запрета. Таким образом, основной алгоритм A^* не вполне подходит для решения для указанной задачи телесной трассировки с заданными ограничениями.

Ограничения алгоритма A^*

При попытке найти оптимальный путь, используя рецепторный алгоритм A^* , возникают некоторые ограничения, требующие решения.

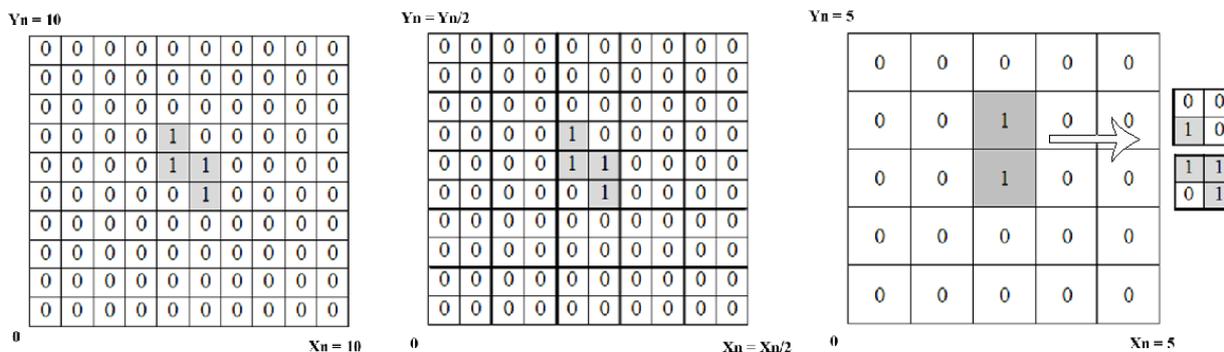
1. Необходимо модифицировать искомый путь, сделать его гладким. Из-за этого требования путь должен удовлетворять конкретным дифференциальным характеристикам (необходимо найти R_{\min})
2. Путь должен минимальное заданное расстояние до уже размещенных объектов.

3. Размер канала может изменяться, что нужно учитывать это при поиске кратчайшего пути в 2D и 3D.

Задача поиска пути по алгоритму A* на сетке с шагом 1x1 пиксель довольно часто встречается и решает проблему нахождения требуемого пути между двумя точками. Поэтому будем модифицировать алгоритм A* с учетом использованных в нем подходов.

Предлагаемый алгоритм трассировки

Как уже отмечалось, в основе предлагаемого метода трассировки лежит адаптивное разбиение пространства компоновки на рецепторы с доведением его до шага 1x1 пиксель (т.е. как в алгоритме A*) – рисунок 9



(a)

(б)

(в)

Рисунок 9 – Пространство трассировки с переменным размером рецептора

На рисунке 9 а представлена сетка с шагом 1x1 пиксель, где ячейками с цифрой 1 обозначена зона запрета, а ячейками с 0 – свободное пространство. В данном случае размер карты 10x10, а ширина пути 1 пиксель. Если необходимо найти путь шириной 2 пикселя, сетка разбивается на соответствующие клетки (например, $Y_n/2$ и $X_n/2$) (рисунок 9 б). Таким образом, размер сетки станет равным 5x5. Если в клет-

ке 2x2 есть хотя бы одна ячейка с **1**, то вся область считается зоной запрета. В нашем примере $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ предполагаются препятствием (рисунок 9 в). Применим алгоритм A* для нахождения пути между начальной и конечной точкой на сетке размером 5x5. В результате будет построен путь шириной 2 пикселя с учетом препятствий. После этого переложим полученный результат на исходную сетку размером 10x10. Если необходимо учесть безопасную зону между препятствием и путем, ее значение добавляется до перехода к новой сетке с измененным размером. Сравнение двух траекторий представлено ниже на рисунке 10.

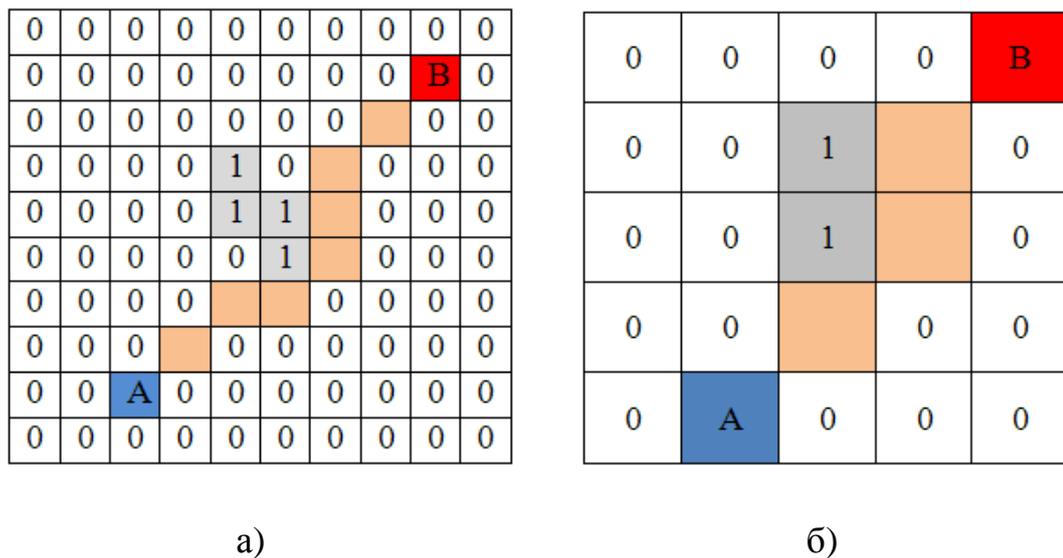


Рисунок 10- Сравнение двух траекторий: а - Path = 1px, Map = 10x10 px; б - Path = 2px, Map = 5x5 px

Алгоритм построения гладкого пути

Предложенный нами алгоритм трассировки с учетом дополнительных ограничений предусматривает выполнение следующих шагов:

1. Ввод параметров для нахождения рационального пути между двумя узлами А и В в 2D или 3D.

2. Найдем основной путь между двумя узлами A и B , используя улучшенный алгоритм A^* и «Штрафы за смену направления». (В методе "Штрафов за смену направления" стоимость пути возрастает всякий раз, когда путь меняет направление, то есть образуется угол. В результате, если путь найден, он будет более гладким, так как исключаются «зигзаги». Такой путь выглядит естественнее. Недостатком применения этого метода является то, что время расчета увеличивается, потому что приходится искать дополнительные узлы).

3. Нахождение всех возможных углов n основного пути (переменная NOA хранит количество углов n).

4. Возьмем из очереди координаты узла $NODE_{i++}$. Будем считать, что $NODE_i := NODE_{i++}$ – угол основного пути.

5. Проверяем, как располагается узел $NODE_i$ на квадратичном графе (в данном алгоритме возможно 4 типа углов – рисунок 11).

6. Проверяем угол $NODE_i$ на наличие пустого пространства в соответствии с типом угла (для этого рисуем квадраты $SQUARE_{ij}$ из начальных координат угла $NODE_i$).

7. Когда препятствие достигнуто (объект или зона безопасности), берется квадрат $SQUARE_{i(j-1)}$ и находится $PtSQUARE_{i(j-1)}$.

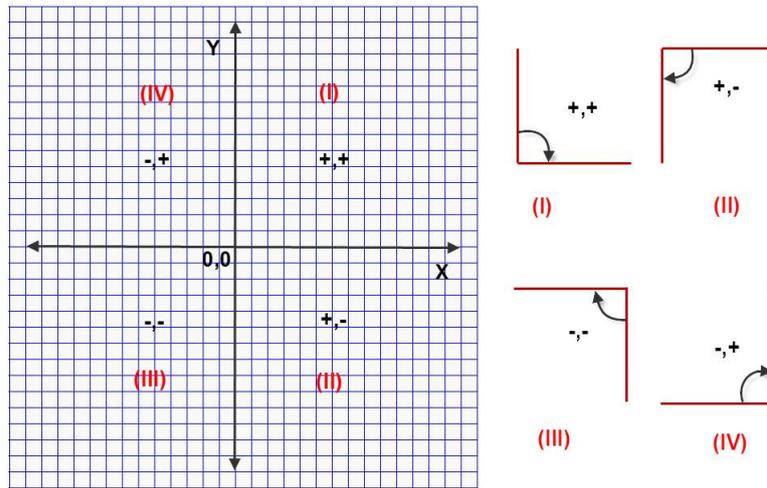


Рисунок 11 - Четыре типа углов в модифицированном алгоритме

8. Положим $PtSQUARE_{i(j-1)}$ как C_i (центр круга).
9. Рассчитаем ARC_i из точки C_i размером R_{min} и возьмем следующие координаты угла (т.е $NODE_{(i+1)}$) и осуществляем сглаживание траектории (рисунок 12).
10. Повторяем шаги 4 – 10.

Структурная схема этого алгоритма построения сглаженного пути представлена на рисунке 13.

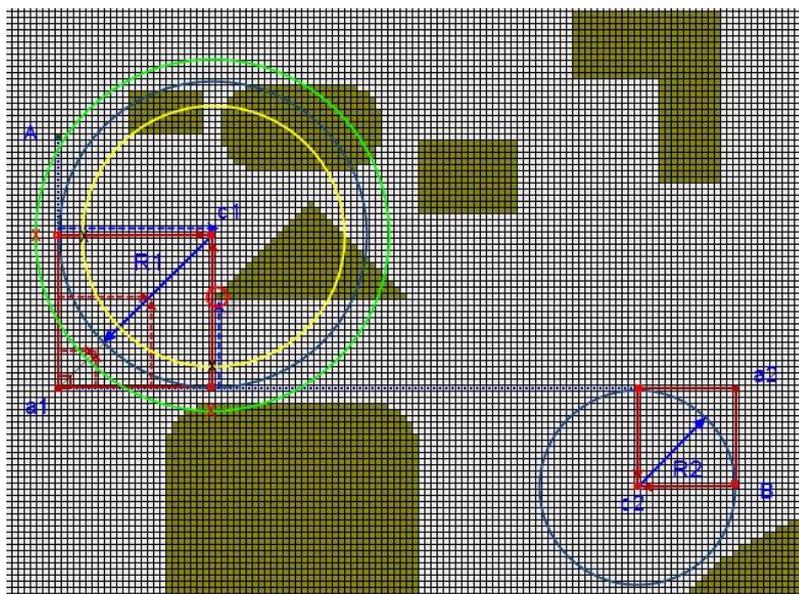


Рисунок 12- Сглаживание пути с учетом R-min

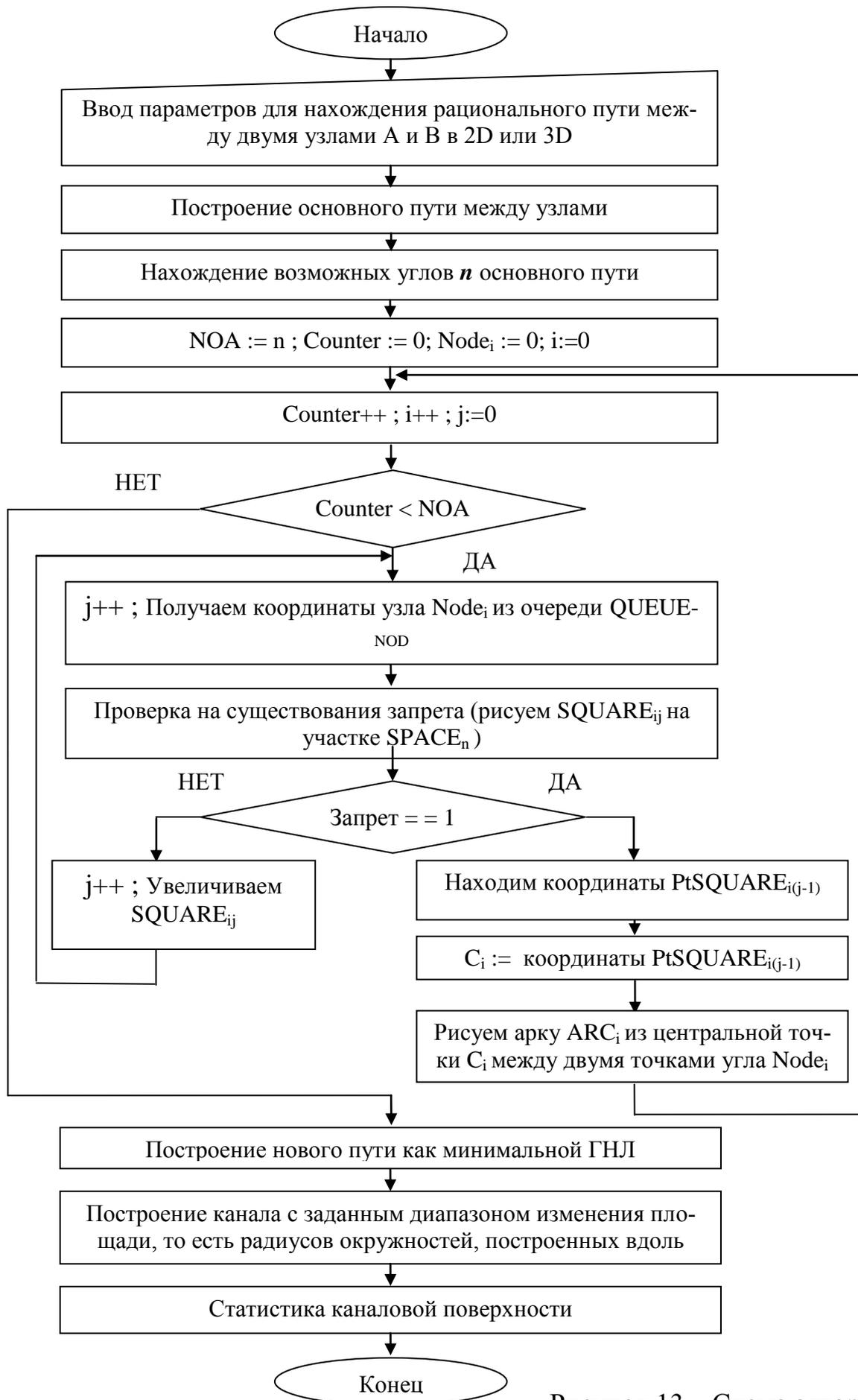


Рисунок 13 – Схема алгоритма

Анализ полученных результатов

Сравнение результатов реализации предложенного нами алгоритма телесной трассировки с известными аналогичными алгоритмами позволило сделать следующие выводы:

1. По сравнению с классическим алгоритмом A^* предложенный нами алгоритм дает фантастический выигрыш в скорости вычислений (примерно в 1300 раз в тестовом примере). В этом примере стандартный алгоритм A^* рассчитывал трассу в рецепторной матрице за 131 секунду, а оптимизированный нами алгоритм показал тот же результат за 100 миллисекунд.
2. По сравнению с наиболее совершенном аналогичным алгоритмом (методом Масатоми Канехары [12], представляющем собой улучшенный алгоритм A^*) (улучшение достигается 8-ми диагональным поиском) наш алгоритм за счет изменение структуры данных для крупномасштабных моделей сокращает длину спроектированной трассы примерно на 15%.
3. Алгоритм Масатоми Канехары, предназначенный для вычисления траектории роботов при обходе препятствия, методом алгоритма A^* выбирает 2 узла рецепторной модели и создается кратчайший путь. Если между 2 узлами есть препятствие, путь отбрасывается (рисунок 14 а). Процедура повторяется до тех пор, пока вычисленный A^* путь не обходит препятствие. В нашем же алгоритме используется механизм штрафов за смену направления, за счет длина траектории укорачивается. Каждый раз, когда алгоритм меняет направление, вес выбранной траектории уменьшается. В результате траектория меняет направление небольшое число раз и выглядит более сглаженной (рисунок 14 б).

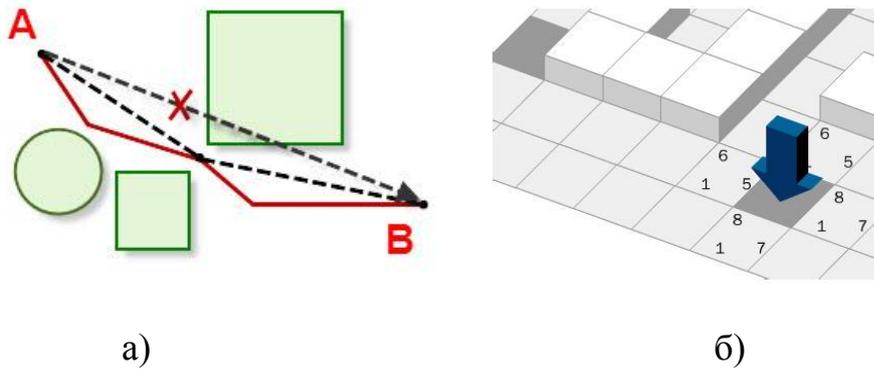


Рисунок 14 – Сравнение алгоритма Алгоритм Масатомо Канехары с предложенным

4. На рецепторном поле на рисунке 15 а показана зона безопасности движений робота по алгоритму Алгоритм Масатомо Канехары, обозначенная разными цветами, которые обозначают расстояние до препятствие (чем темнее цвет, тем ближе область запрета, чем светлее – тем дальше). Из этого рисунка видно, что траектория робота по этому алгоритму имеет постоянный размер. Для нашего же алгоритма предусматривается добавления большего свободного места до областей запрета, благодаря чему найденная траектория может быть переменного размера, что соответствует случаю компоновки канала переменного сечения (рисунок 15 б). Кроме того, наш алгоритм допускает нахождение нескольких траекторий между уже размещенными объектами в 2D и 3D объектами (рисунок 15 в).

5. И, наконец, алгоритм Алгоритм Масатомо Канехары предусматривает построение траектории робота при обходе препятствий по траектории из отрезков прямых (рисунок 16 а), в то время как предложенный алгоритм для сглаживания пути использует дуги окружностей, выбирая при этом их радиус не меньше, чем заданный минимальный радиус R_{\min} (рисунок 16 б)

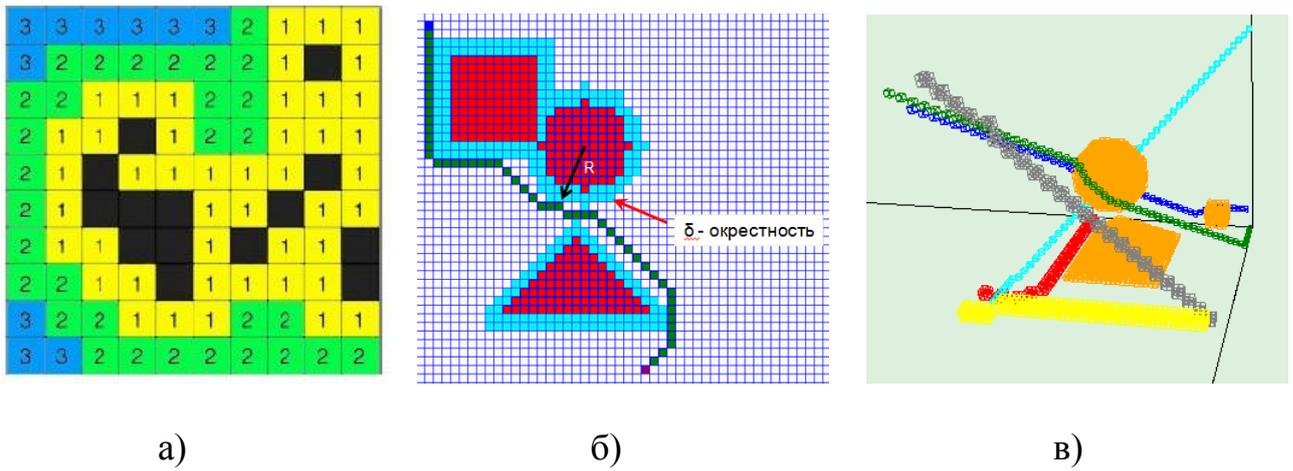


Рисунок 15 - Сравнение алгоритма Алгоритм Масатомо Канехары с предложенным:
 а – траектория по алгоритму Масатомо Канехары; б - траекторию по предложенному алгоритму; в – возможность построения множества траекторий по предложенному алгоритму

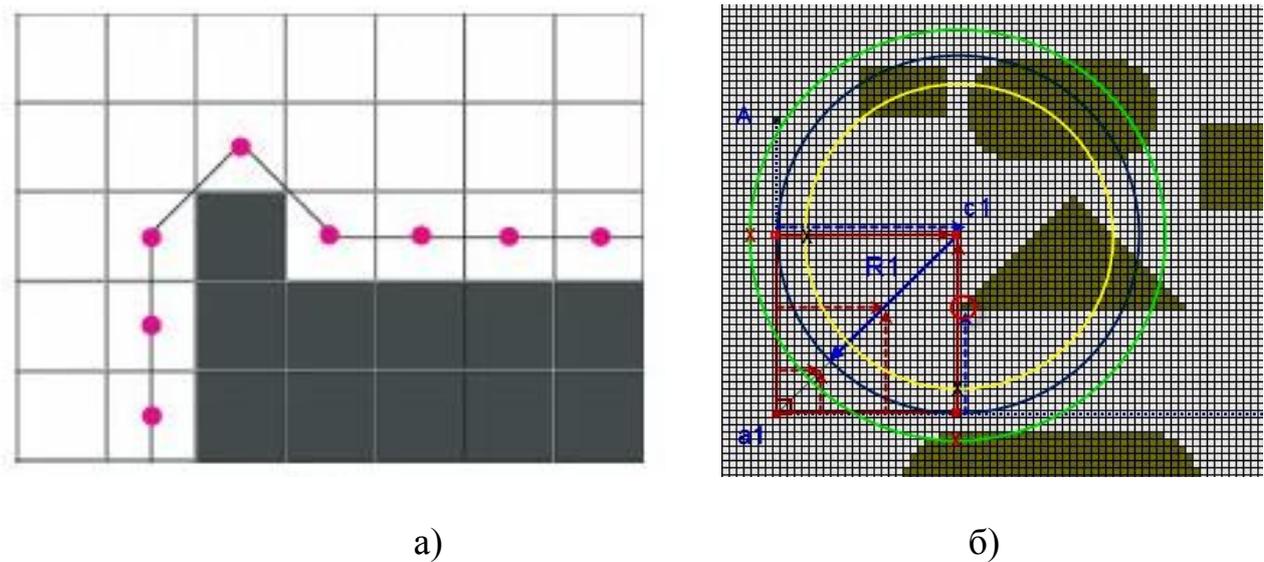


Рисунок 16 - Сравнение алгоритма Масатомо Канехары с предложенным:
 а – траектория в виде отрезков прямых по алгоритму Масатомо Канехары; б – сглаживание траектории до заданного радиуса по предложенному алгоритму

Выводы и рекомендации

Таким образом, предложенный нами алгоритм телесной трассировки позволяет решить задачу компоновки соединительных трасс при проектировании авиационной и любой другой транспортной техники. По своей сущности он является глубокой модификацией известного алгоритма A^* и обладает рядом преимуществ (прежде всего по быстродействию) по сравнению с другими известными модификациями этого алгоритма. Однако переход от параметрических моделей, используемых при традиционном проектировании (в том числе и с использованием САПР) к рецепторным в настоящее время представляется довольно непривычным для проектанта. Быстрый рост возможностей вычислительной техники делает дискретные рецепторные модели все более привлекательными и все более востребованными.

Библиографический список

1. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов.-М.:Машиностроение,1988.
2. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования.-Киев: Наук. думка, 1986.
3. Стоян Ю.Г., Гиль Н.И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов.- Киев: Наук. думка, 1976.
4. Осипов В.А. Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей. -М.: Машиностроение, 1979.
5. Аристова И.В. Особенности математической модели задачи размещения одно-связанных объектов с учетом технологических ограничений // В сб. "Методология

- решения прикладных оптимизационных задач”.-Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН Украины, 1992,-с. 30-35.
6. Калинин Б.В. Автоматизация синтеза и топологии размещения коммуникационных сетей: Автореф. дис. канд. техн. наук. Куйбышев: КуАИ, 1985. - 16 с.
7. Зозулевич Д.М., Шерлинг Д.Р. Методы реализации на ЭЦВМ теоретико-множественных операций над плоскими многосвязанными областями. // В кн. “Вычислительная техника в машиностроении”. -Минск: ИТК АН БССР, 1969, с. 26-35.
8. Корн Г.В. Применение рецепторных моделей при компоновке изделий авиационной техники // В сб. “Интегрированные системы автоматизированного проектирования” Тезисы докл. Всес. научн.-техн. конф. М., 1989, с. 155-157.
9. Ситу Лин. Использование рецепторных моделей для компоновки незаполненных пространств. // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: труды VII Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – М.: Изд-во Вузовская книга – МАИ. – 2010. – С.87 -88.
10. E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. // Numerische Mathematik. V. 1 (1959), P. 269-271.
11. Matthews, James: Basic A* Pathfinding Made Simple. AI Game Programming Wisdom, Charles River Media, 2002, P. 105-113.
12. Masatomo KANEHARA, Satoshi KAGAMI, James.J Kuffner, Simon Thompson, Hiroshi MIZOGUHI: “Path shortening and smoothing of grid-based path planning with consideration of obstacles.”, Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference, P. 991-996.