

УДК 515.2

Применение рецепторных геометрических моделей в задачах автоматизированной компоновки авиационной техники

Ньи Ньи Хтун^{1*}, Маркин Л.В.^{1}, Соседко А.А.^{2***}**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

Компания «АСА», ул. М. Джалиля, 10/1, 115573, Россия

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

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

****e-mail:info@asa-2.ru*

Аннотация

Рассмотрены геометрические аспекты автоматизированной компоновки транспортной (прежде всего авиационной) техники. Для решения поставленной задачи предлагается использовать дискретные методы описания пространства компоновки (рецепторные модели), на основании которых сформирован алгоритм проектирования соединительных трасс, размеры которых сопоставимы с размерами уже скомпонованных объектов (так называемая телесная трассировка). Дополнительным требованием к проектированию таких трасс является требования обеспечения заданной гладкости линии тока трассы. Основное направление модификации известных алгоритмов – оптимизация эвристической функции алгоритма, определяющей выбор направления поиска к целевой вершине, что позволяет алгоритму избежать обхода многих лишних вершин. Проведена оценка точности рецепторных геометрических моделей и показаны особенности их использования на примере легкого самолета “АСА-2”.

Ключевые слова: проектирование, трассировка, рецепторные модели, телесная трассировка, каналовые поверхности, обход препятствий, сглаживание траектории, зоны обслуживания, оценка точности

Постановка задачи

Проектирование современной авиационной техники невозможно без применение методов автоматизированного проектирования, позволяющих сократить сроки и повысить качество проектирования. Однако любая автоматизация творческих процессов предусматривает разработку математического и программного обеспечения этих процессов, что порой представляет значительные трудности. К числу таких трудоформализуемых творческих процессов относится автоматизация компоновочных работ [1], т.к.:

- авиационная техника представляет собой чрезвычайно сложное техническое изделие с очень высокой плотностью компоновки;

- проектирование компоновок требует такого конструкторского качества, как развитое пространственное и ассоциативное мышление, которое только с годами вырабатывается у проектанта-компоновщика и которым компьютер ни в малейшей степени не обладает.

Традиционно для проверки компоновочных решений использовались физические макеты, которые позволяли выявить все нестыковки компоновочных решений, невыявленные на бумажных чертежах. Хотя физический макет и позволял получить максимально наглядный результат компоновки, на котором можно было исправить все ошибки, но его создание (даже из дерева) было долгой и дорогой операцией, замедлявшей процесс проектирования. К тому же неизбежное в процессе создания

авиационной техники изменение конструкции вызывало необходимость создания новых, “доработанных” макетов. С внедрением в проектную деятельность САПР вообще и в частности систем геометрического моделирования в частности, задача устранения случаев взаимного пересечения объектов стала решаться “на автомате” средствами самой системы геометрического моделирования, но с одним существенным “но” – эта проверка могла осуществляться только на уже имеющейся компоновке. Получение же исходной компоновки оставалась и остается процессом творческим, в большой степени зависящем от квалификации проектанта-компоновщика.

Не обладая пространственным и ассоциативным мышлением компьютер, тем не менее, имеет свои сильные стороны, выгодно отличающие его от человека – возможность быстро просчитывать варианты компоновки и “ничего при этом не забывать”. В данной статье сделана попытка обобщить опыт создания математического и программного обеспечения для автоматизации компоновочных работ при создании авиационной техники.

С математической точки зрения задача компоновки авиационной техники (впрочем, как и любой другой) может быть сформулирована как оптимизационная задача следующего вида. Пусть имеется N компонуемых 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: выбор функции цели $\Phi (X)$, выбор переменной X , 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 [2].

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

$$Extr \Phi (X) \text{ при } X \subset \Omega \tag{1}$$

$$K_V \rightarrow 1$$

$$L_{\Sigma} \rightarrow \min$$

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 суммарную протяженность трассы L_{Σ} (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 и заданный график площадей.

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

Метод решения задачи и принятые допущения

Впервые задача автоматизированной компоновки была решена методом линейного программирования как задача плотного размещения (раскроя) плоских прямоугольников Залгаллером В.А. Общие вопросы компоновки рассматривались в работах В.Л.Рвачева, Ю.Г.Стояна, Н.И.Гиля, В.Н.Гаврилова и их учеников.

Принципиальной особенностью вышеназванных подходов является ориентация на переборные алгоритмы, включая:

- начальный перебор порядка размещаемых объектов (так называемая метризация пространства перестановок);

- перебор положений размещаемого объекта в области допустимого размещения Ω с последующей проверкой условия взаимного непересечения с другими скомпонованными объектами и областями запрета, а также вычисление коэффициента эффективности компоновки.

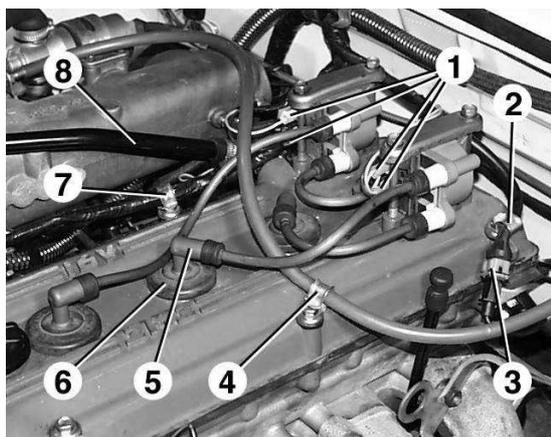
Известные методы автоматизированной компоновки позволяют получить приемлемый результат для компонуемых объектов простых геометрических форм (сферы, параллелепипеды), однако для современной техники (даже не авиационной) характерны гораздо более сложные геометрические формы (рисунок 1).



Рисунок 1 – Компоновка моторного отсека современного автомобиля

Анализ существующих методов проектирования и геометрических моделей каналовых поверхностей

Целью проектирования каналовой поверхности является доставка по определенной траектории некоторого материального носителя (жидкости, газа, электрической энергии от одной точки (точки входа) технического изделия к другой (точке выхода). Для решения поставленной задачи используется два основных подхода к трассировке определяемые используемой метрикой. Метрика - это правило, по которому в данном пространстве определяется расстояние между двумя точками Первый подход – использование Евклидовой метрики. В этом случае трасса проводится в направлении кратчайшего расстояния между точками входа и точками выхода (рисунок 2) и длина трассы определяется по теореме Пифагора.



Евклидова метрика – трасса проводится в направлении кратчайшего расстояния

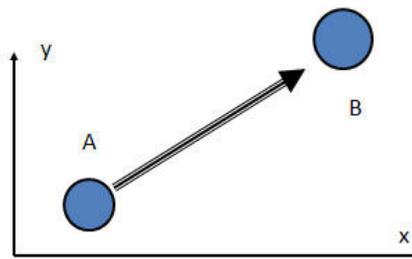


Рисунок 2 - Проектирование трассы по евклидовой метрике

Вторым подходом является использование Манхэттенской метрики, при которой – трасса проводится в направлении координатных осей (рисунок 3). Этот термин введен математиком Германом Минковским и связан с уличной планировкой города Манхэттена). В этом случае расстояние между точками перегиба трассы равно сумме модулей разностей их координат. Трасса в этом случае получается значительно длиннее, чем при использовании Евклидовой метрики, но сам подход дает дополнительные математические возможности для проектирования трассы. Этот подход используется при трассировке больших интегральных схем и печатных плат, так как движущиеся по трассе электроны “очень быстрые” и им все равно в какую сторону двигаться. Поэтому резкое изменение траектории и некоторое ее удлинение не оказывает никакого влияния на качество трассировки. Для проектирования же трасс, по которым перемещаются газы или жидкости этот тип метрики практически не применяется.

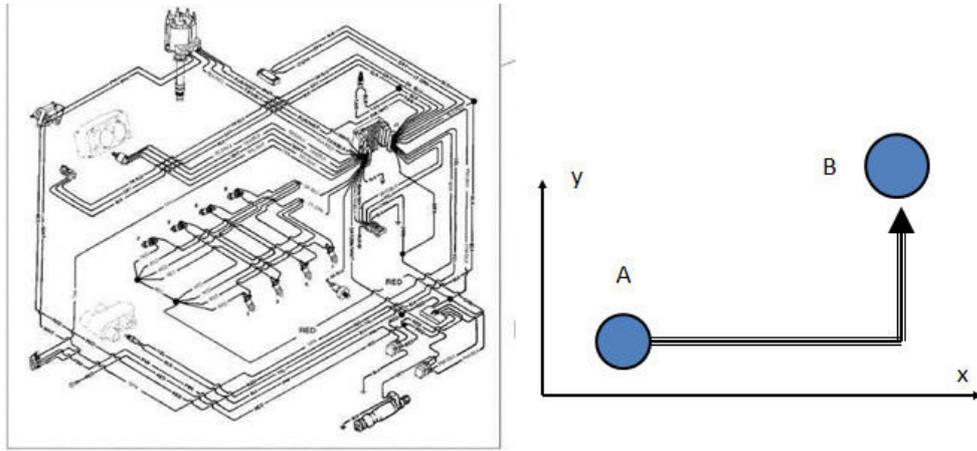


Рисунок 3 – Проектирование трассы с использованием Манхэттенской метрики

Первоначально под каналовой поверхностью обычно понималась поверхность, являющаяся огибающей семейства сфер постоянного радиуса, центры которых лежат на плоской или пространственной кривой. Однако заданный таким образом канал относится лишь к узкому классу поверхностей каналового типа, а именно к трубчатым поверхностям. Позднее из гидравлики пришло несколько расширенное определение каналовой поверхности, как поверхности с нормальными конгруэнтными сечениями произвольной формы.

Известно более широкое геометрическое определение каналовой поверхности, по которому каналовой поверхностью названа кинематическая поверхность, образованная непрерывным каркасом замкнутых плоских поперечных сечений произвольной формы, не обладающих подобием, перпендикулярных касательным к пространственной кривой (оси канала), проходящей через центры тяжести их площадей, причем площади поперечных сечений должны удовлетворять некоторой наперед заданной зависимости.

Однако и это определение также не охватывает всего многообразия каналовых поверхностей и законов их образования. В практике конструирования воздуховодов

нашли широкое применение каналовые поверхности, образованные непрерывным каркасом замкнутых плоских поперечных контуров, лежащих во взаимно параллельных плоскостях (рисунок 4 а). Возможно построение каналовых поверхностей, образованных перемещением вдоль осей образующих, плоскости которых наклонены под постоянным, не равным 90° , или переменным углом к касательным к осям каналов. Совсем не обязательным является условие прохождения расчетной линии тока (ось канала) через центры тяжести поперечных сечений.

Однако наиболее полно требованиям обеспечения заданных условий протекания потока газа или жидкости соответствует размещение плоскостей сечений перпендикулярно линии тока (рисунок 4 б). В этом случае с точки зрения геометрии каналовая поверхность определяется совокупность контуров поперечных сечений, плоскости которых перпендикулярны касательным к главной направляющей линии (оси) канала.

Так как основное назначение каналовых поверхностей в технике заключается в переносе жидкостей или газов к различного рода силовым установкам и рабочим агрегатам, то в силу этого задача проектирования каналовой поверхности неразрывно связана с гидро- или аэродинамическими характеристиками потока. Основным элементом, связывающим все параметры сложной каналовой поверхности, является линия тока, называемая главной направляющей линией (ГНЛ). Это относится как к поверхностям с плоскостью параллелизма, так и к нормальным каналовым поверхностям. Она выявляется уже на стадии эскизных проработок изделия. Чаще всего в инженерной практике в качестве ГНЛ принята средняя линия тока (ось) каналовой поверхности. В общем случае это пространственная кривая. Задается она либо гра-

фически, либо аналитически, либо узловыми точками (дискретно). При компьютерном проектировании графическая или дискретная информация о ГНЛ должна быть преобразована и представлена в аналитической форме.

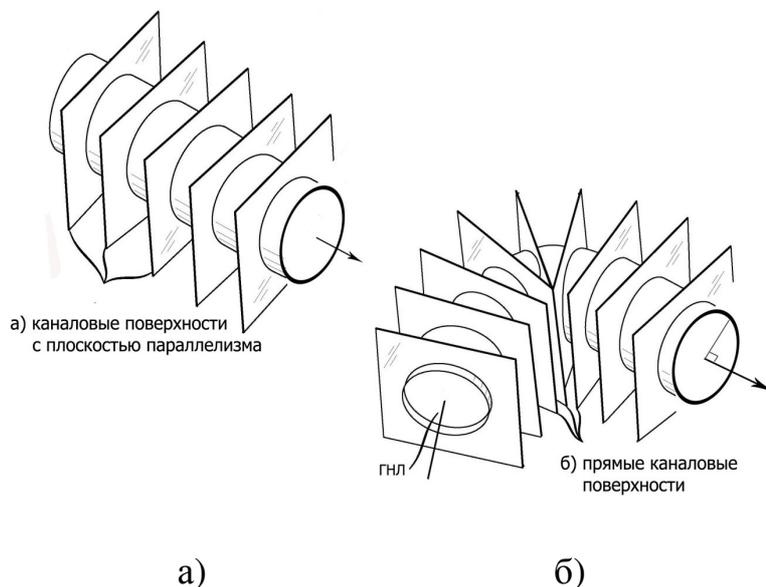


Рисунок 4 – Задание каналовой поверхности поперечными сечениями: *а* – сечения с плоскостью параллелизма; *б* - нормальные сечения каналовой поверхности

Исходя из всего сказанного, можно констатировать, что подавляющее большинство исследований в этой области основано на представлении каналовой поверхности Φ как поверхности, образованной каркасно-кинематическим способом (рисунок 5). Управление параметрами как траектории (ГНЛ) s , так и формы сечения в перемещаемой плоскости Σ . В качестве метрических направляющих обычно берем контурные и характеристические линии. Все это позволяет сформировать поверхность с наперед заданными дифференциально-геометрическими характеристиками [4].

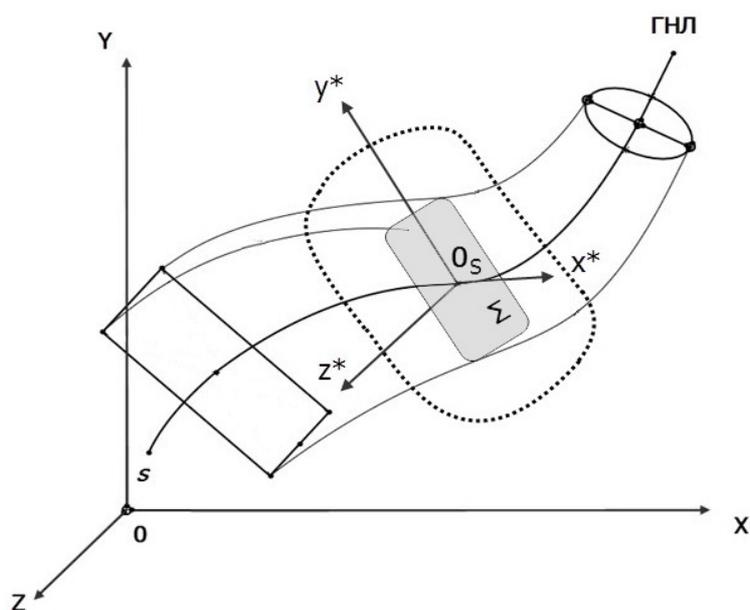


Рисунок 5 – Задание каналовой поверхности каркасно-кинематическим способом

Среди дополнительных технических характеристик каналовой поверхности можно выделить: минимум гидравлических потерь в пограничном слое потока и потоке в целом, повышение или понижение давления в потоке, поворот потока и др. В связи с этим необходимо проектировать каналовые поверхности так, чтобы они удовлетворяли наперед заданным техническим требованиям, а именно: гладкости обводов, описывающих поперечные и продольные образующие поверхности; равномерности кривизны направляющей линии; соблюдению определенной зависимости площадей поперечных сечений канала вдоль его длины.

Обоснование выбора метода геометрического моделирования телесной трассировки

Из проведенного выше анализа методов геометрического моделирования соединительных трасс следует, что, с одной стороны, известны методы и геометриче-

ские модели точного описания каналовых поверхностей (даже с учетом их дифференциально-геометрических характеристик), что, однако, практически исключает их автоматизированную компоновку ввиду исключительно сложного аналитического описания. С другой стороны, известны методы и геометрические модели автоматизированной компоновки объектов, которые применимы лишь к объектам простых геометрических форм (примитивам и композициям примитивов). Таким образом, для проектирования каналовых поверхностей между двумя объектами в транспортной 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.

Приведенный выше анализ научных публикаций в этой области показал, что решение задачи телесной трассировки в вышеописанной постановке (т.е. с учетом требований компоновки и плавности одновременной) отсутствует. 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.

Отдельной строкой можно рассматривать возможности, предоставляемые современными САД-системами, позволяющими своими инструментальными сред-

ствами выявить случаи взаимного пересечения уже скомпонованных объектов в созданной виртуальной моделировке. Но в этом случае речь идет не об автоматизированной компоновке, а о проверке уже сгенерированной с учетом опыта и интуиции проектанта варианта компоновки.

Таким образом, при решении поставленной задачи нам приходится выбирать рациональную геометрическую модель из дилеммы – что лучше – точная геометрическая модель, автоматическая компоновка которой невозможна, или грубая геометрическая модель, допускающая возможность автоматизированной компоновки. Попробуем при решении задачи автоматизированной компоновки каналовых поверхностей выбрать компромиссное решение среди моделей в классе методов аналитической аппроксимации.

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 $A = \{a_{i,j}\}$, 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 6).

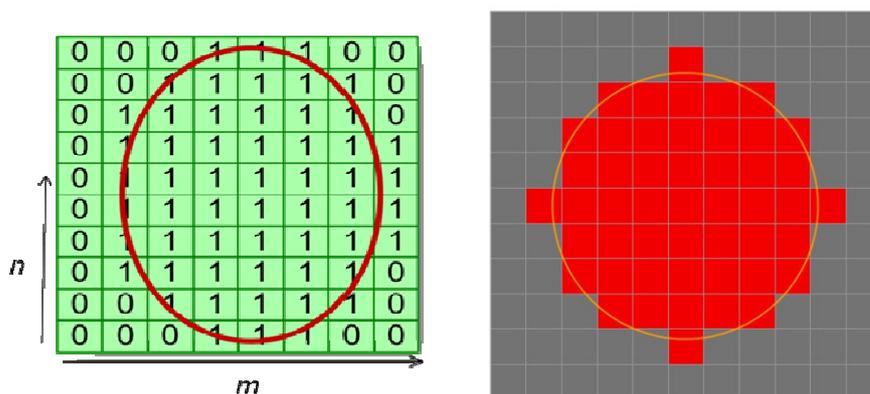


Рисунок 6 - Рецепторная модель 2D-тела

Существенной проблемой при решении задачи трассировки является обход препятствий, в качестве которых выступают уже скомпонованные объекты или коммуникации между ними. Большим преимуществом рецепторного подхода 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 (рисунок 7).

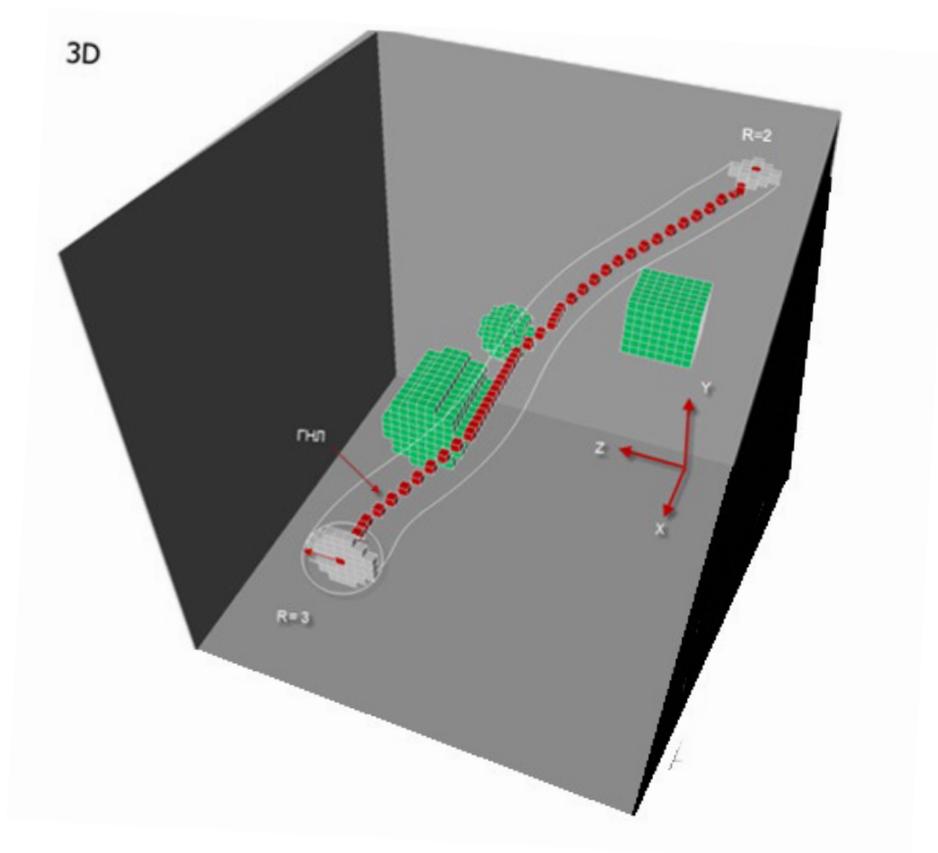


Рисунок 7 – Принцип обхода препятствий при построении каналовой поверхности рецепторным методом

Очевидно, что точность описания геометрической формы объекта зависит от выбранной нами дискретности рецепторной матрицы. По нашему мнению, наиболее близко используют подобный подход следующие известные алгоритмы трассировки [5,6,7]:

- Алгоритм Дейкстры
- Алгоритм A* «А звездочка»

Принцип работы этих алгоритмов близок к методологии рецепторных геометрических моделей, большим преимуществом которых является легкость обнаружения препятствия по коду рецептора (0 или 1). Наипростейшим подходом, реализо-

ванном в этих алгоритмах, 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.

Структура выбора направления движения определяется правилом:

двигаться туда

иначе

выбрать другое направление в соответствии со стратегией обхода.

Это позволяет утверждать, что в этих алгоритмах заложены элементы искусственного интеллекта (ИИ), так как решение выбирается по предикативному принципу “Если” – “То”.

В работах Дейкстры (Dijkstra, E. W.), Дональда Эрвина Кнута (Donald Ervin Knuth), Томаса Кормена (Thomas H. Cormen), Чарльза Лейзерсона (Charles Leiserson) и других авторов 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. Анализ работы таких алгоритмов показал ограниченность их возможностей – они смогли пройти путь от начальной до конечной точек, они сделали это не рационально. Привязанные к препятствиям (областям запрета), в соответствии с заложенными в них эвристиками они держались их “как слепой стены”, сделав при этом чрезвычайно много лишних движений и многократно неоправданно изменяя направление перемещения (рисунок 8), причем рецепторный алгоритм A* действует более разумным способом и обычно используется для нахождения оптимального кратчайшего пути. Все это говорит о том, что даже наиболее совершенный

алгоритм A^* нуждается в существенной модификации, но может быть взят за основу как прототип для разработки новых алгоритмов, позволяющих решить поставленную задачу – разработку моделей и алгоритмов пространственной телесной трассировки.

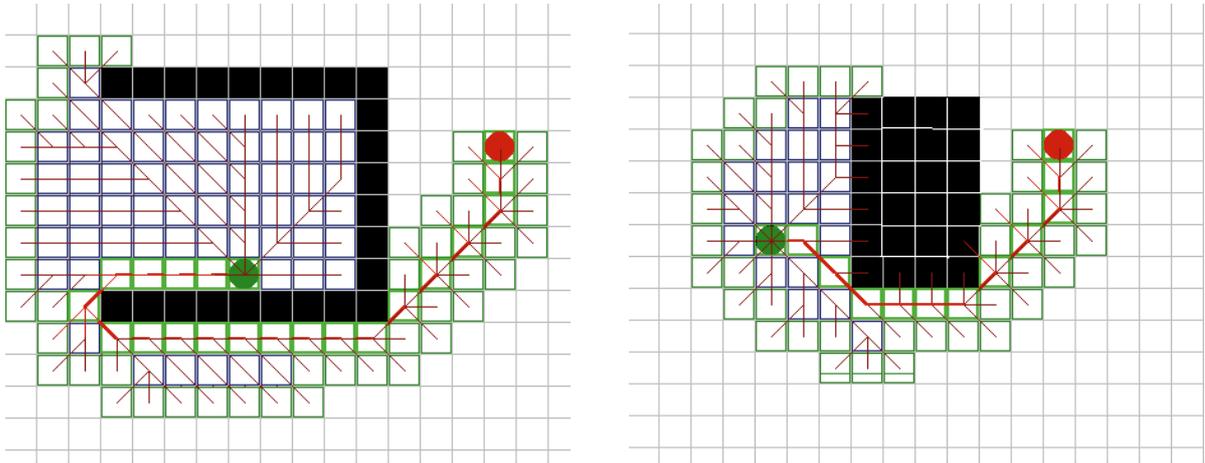


Рисунок 8 - Примеры трассировки при обходе различных препятствий (в 2D постановке) по алгоритмам Дейкстры и A^*

Разработка эвристик для построения главной направляющей линии канала

Как уже было отмечено ранее, наиболее сильной стороной алгоритма A^* , обусловившей его выбор нами в качестве прототипа - это возможность оптимального и эвристического поиска трассы. В литературе показано, что во многих случаях эвристический поиск работает лучше других стратегий поиска [8].

Эвристическая функция алгоритма $h(n)$ определяет выбор направления поиска к целевой вершине. Если эвристическая функция допустима (то есть не превышает минимальную стоимость графа к целевой вершине), тогда алгоритм A^* гарантиро-

вано найдет кратчайший путь. Однако предпочтительнее использовать эвристику, которая снижает минимальную стоимость настолько, насколько это возможно, что приведет к уменьшению числа вершин, которые необходимо рассмотреть. Идеальная эвристика всегда возвращает фактическую минимальную стоимость, необходимую для достижения оптимальной по расстоянию вершины. Эвристика манхэттенского расстояния, представленная на рисунке 9 а, определяется как $h(n) = |x_a - x_b| + |y_a - y_b|$, где (x_a, y_a) и (x_b, y_b) координаты текущей и целевой вершины, соответственно. Эвристика идеальна, когда используются 4 смежные вершины. Эвклидова эвристика (рисунок 9 б) определяется, как $h(n) = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}$ и является допустимой, но, как правило, значительно превышает фактическую стоимость пути. Это означает, что алгоритм обойдет слишком много лишних вершин, что увеличит время нахождения пути.

Эвристика диагонального расстояния [9] определяется, как

$$h(n) = |x_a - x_b| + |y_a - y_b| + (\sqrt{2} - 2) \min(|x_a - x_b|, |y_a - y_b|)$$

и представлена на рисунке 9 в. Эвристику, сочетающую в себе компоненты манхэттенской и евклидовой, можно считать рациональной. Ее преимуществом является то, что определяется фактическая минимально возможная стоимость пути к цели, если используется 8 смежных вершин. Кроме того, в вычислениях удастся избежать от квадратного корня, что позволяет проводить вычисления значительно быстрее и эффективнее, чем при евклидовой эвристике. Было обнаружено, что использование эвристики манхэттенского расстояния позволяет производить поиск на 40% быстрее, по сравнению с двумя другими эвристиками, при небольшом увеличении

стоимости решения, под которым мы понимаем необходимые вычислительные затраты для реализации этого алгоритма.

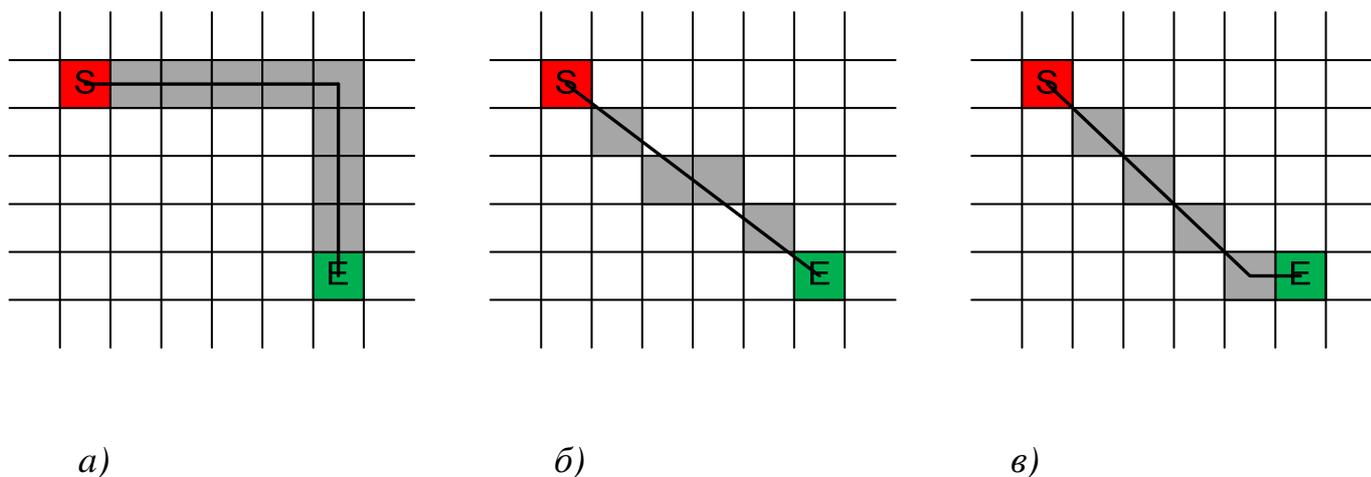
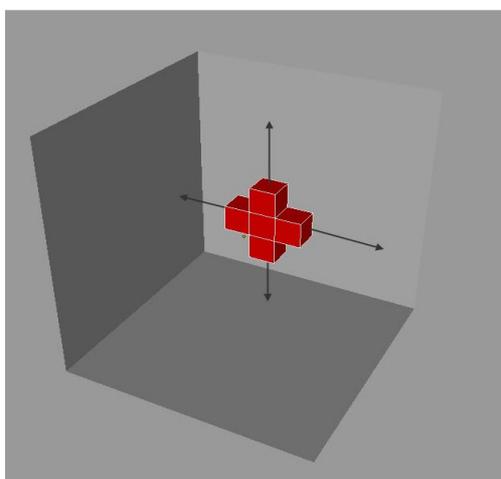


Рисунок 9 –Используемые эвристики при выборе направления к целевой точке: *а* – ориентированные на манхэттенское расстояние; *б* - на евклидово расстояние; *в* - на диагональное расстояние

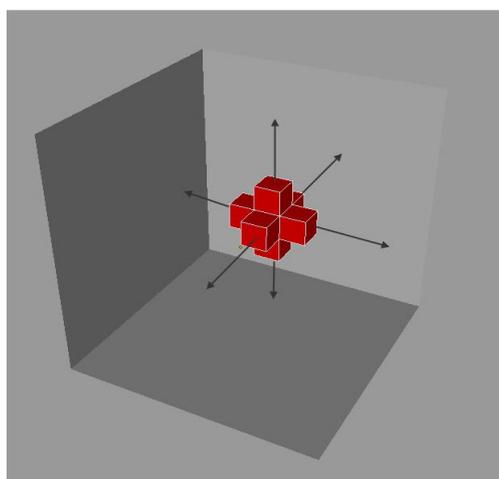
Другим важнейшим вопросом, определяющим функционирование нашего алгоритма, является **выбор направления поиска**, также определяемый эвристическими методами. Для нахождения пути от начальной до целевой вершины необходимо определить, каким образом будут выбираться дочерние вершины. Обычно алгоритмы поиска пути ведут поиск в 4 и 8 направлениях (рисунок 10 *а, б*). Но в нашем алгоритме для поиска пути в 3D используется многонаправленный выбор направления по 26-и смежным вершинам, показанный на рисунке 10 *в*. В результате использования совокупности всех этих приемов скорость работы нашего алгоритма повышается в 300 – 1200 раз по сравнению с исходными.

Анализ полученных результатов

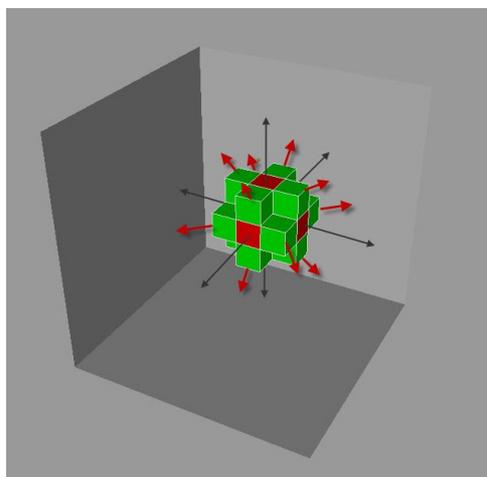
Использование рецепторного метода как метода геометрического моделирования трасс имеет как свои преимущества, так и свои недостатки. Как уже отмечалось, к преимуществам метода относится уникальная легкость определения условия взаимного непересечения с уже размещенными объектами, недостатком – принципиальная невозможность создания объектов с высоким порядком гладкости. Поэтому наиболее эффективно использование предложенного рецепторного метода проектирования телесных трасс для модификации уже существующих конструкций.



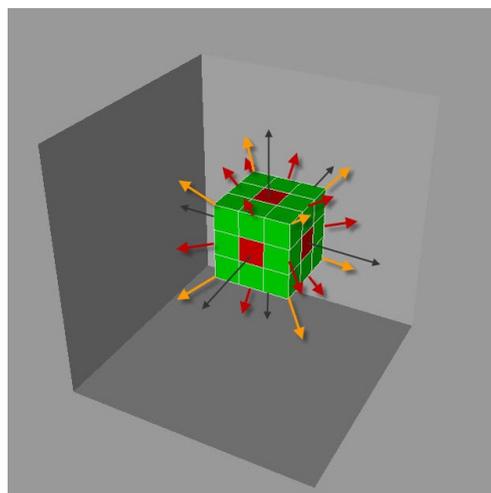
a)



б)



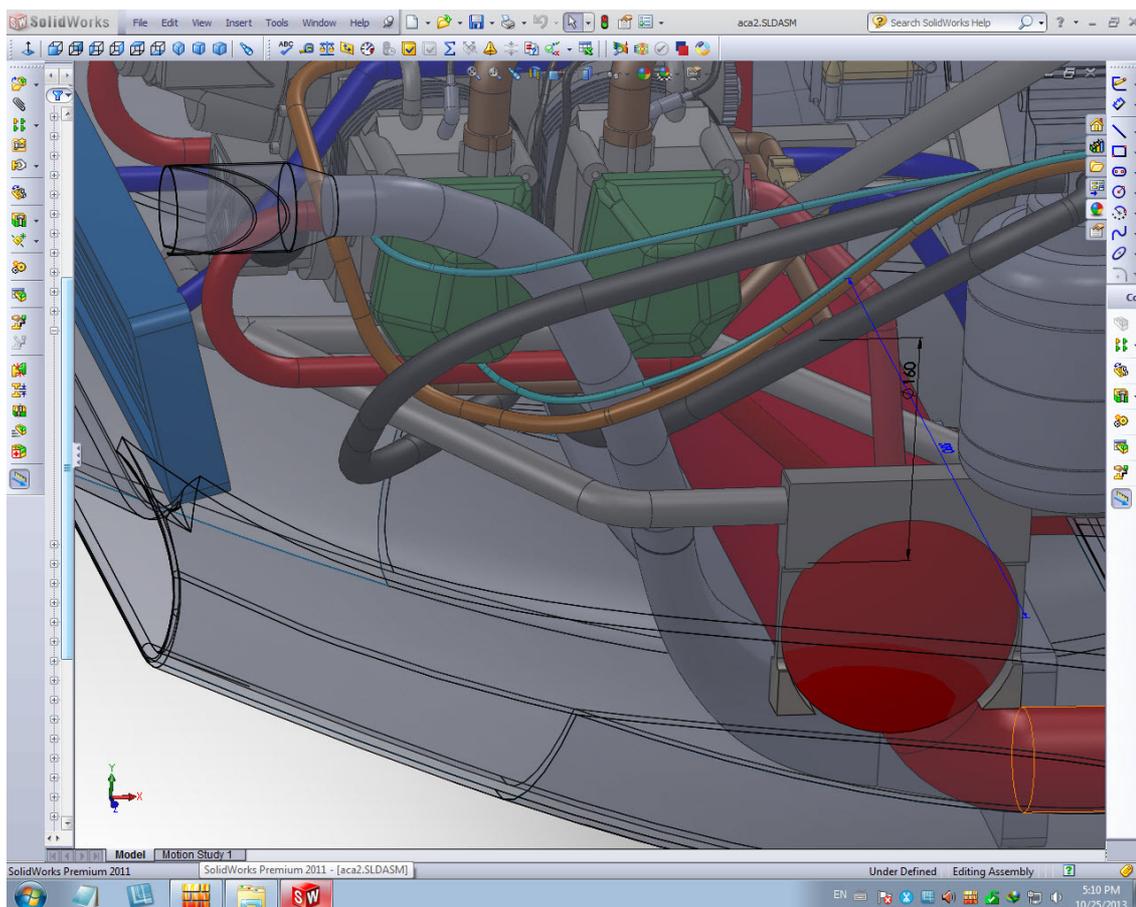
в)



г)

Рисунок 10 - Поиск пути в рецепторном поле в 3D изображении: *а* - по 4-м смежным вершинам; *б* – по 8-ми смежным вершинам; *в* – по 26-и смежным вершинам

Примером применения предложенного метода проектирования каналов среди уже размещенных объектов является проектная проработка возможности прокладки воздухопроводов среди уже существующей компоновки легкого самолета “АСА-2” (рисунок 11). Так как в существующем виде разработанная рецепторная геометрическая модель не интегрирована в какую-либо САД-систему, полученные на основании разработанной нами модели расчетные данные в дальнейшем приходится визуализировать вручную в САД-системе (в нашем случае в SolidWorks).



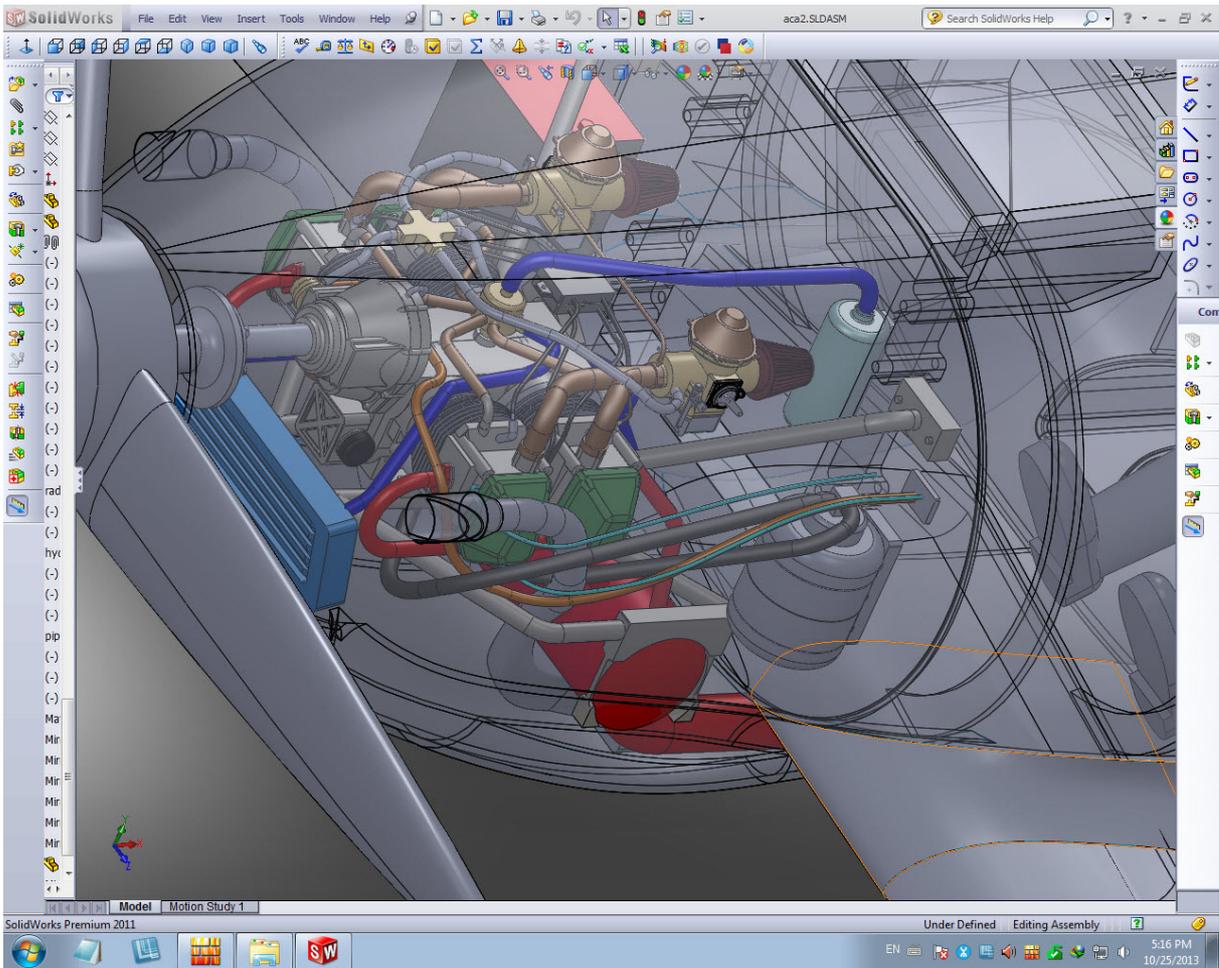


Рисунок 11 – Визуализация принятого компоновочного прокладки воздуховода в легком самолете “АСА-2”

Общая оценка точности рецепторного представления геометрических объектов приведена в работе Ситу Лина [10], точность описанных модифицированных алгоритмов проверялась на тестовых примерах с частным заранее известным результатом. представлена на рисунке 12. Естественно, итоговая погрешность зависит от дискретности рецепторной матрицы (чем меньше размер рецептора, тем выше точность) и при ее размере рецептора, например, 0,2 мм составляет 0,12 мм при доверительном интервале $\pm 3\sigma$, что вполне достаточно для этапа проектирования новой трассы и является разумным компромиссом между ожидаемой точностью алгоритма

и затратами вычислительных ресурсов для его реализации. Необходимо отметить, что имеются немалые резервы для снижения и требуемой вычислительной мощности при реализации рецепторных геометрических моделей (например путем использования адаптивных размеров рецептора), однако рассмотрение этого вопроса выходит за рамки настоящей статьи. Быстрый рост производительности вычислительной техники делает дискретные рецепторные модели все более привлекательными и все более востребованными в практике проектирования высокотехнологичной техники.

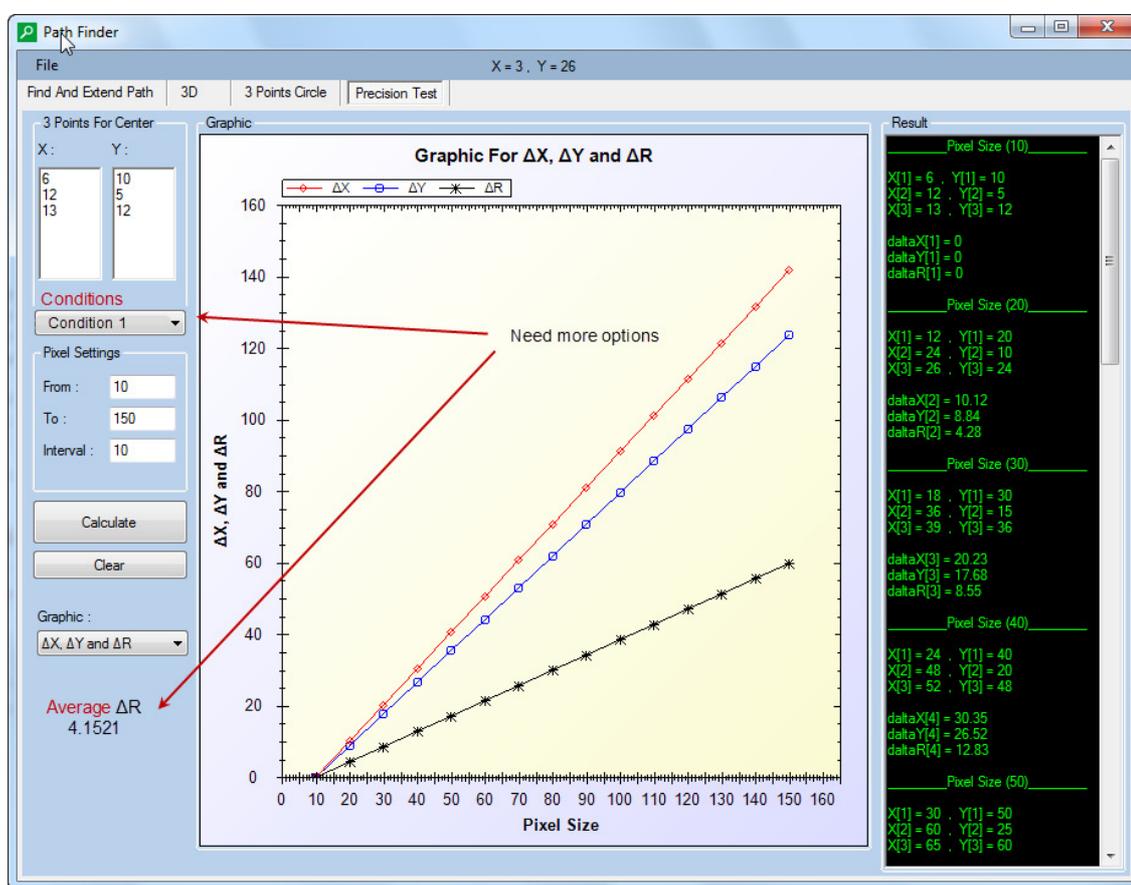


Рисунок 12 – Результаты оценки точности работы модифицированного алгоритма

Выводы и рекомендации

Предложенный нами и описанный в данной статье алгоритм телесной трассировки является глубокой модификацией известного алгоритма трассировки печат-

ных плат A^* и обладает рядом преимуществ (прежде всего по быстродействию) по сравнению с другими известными модификациями этого алгоритма. Прежде всего то возможность проектирования траекторий, с уровнем кривизны не менее заданной и возможность обходить препятствия на заданном расстоянии. Это достигается изменением эвристик, определяющих порядок выбора направления возможного прохождения трассы, что позволяет решить задачу компоновки соединительных трасс при проектировании авиационной и любой другой транспортной техники. Наиболее эффективен такой подход при модификации существующих компоновок, что показано на примере легкого самолета "АСА-2". Быстрый рост мощности вычислительной техники делает дискретные рецепторные модели все более привлекательными и все более востребованными, позволяет увеличивать их точность и расширять сферы применения.

Библиографический список

1. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов.-М.:Машиностроение,1988. С.136.
2. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования.-Киев: Наук. думка, 1986. С.268.
3. Стоян Ю.Г., Гиль Н.И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов.- Киев: Наук. думка, 1976. С.248.
4. Осипов В.А. Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей. -М.: Машиностроение, 1979. С.248.
5. E. W. Dijkstra. A note on two problems in connation with graphs. // Numerische Mathematik, 1959, V. 1, P. 269-271.
6. Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4 4 (2) (1968): pp. 100–107.

7. Rabin S. *AI Game Programming Wisdom*, Charles River Media, 2002, 672 p.
8. Khammapun Khantanapoka and Krisana Chinnasarn: Path finding of 2D & 3D Game Real-Time Strategy with Depth Direction A*Algorithm for Multi-Layer //Eighth International Symposium on Natural Language Processing, Thailand, 2009, pp. 184-188.
9. Wichmann D. R.: Automated Route Finding on Digital Terrains // COMPSCI 780 Project Report, Graphics Group, Dept. of Computer Science, University of Auckland, New Zealand, February 2004.
10. Ситу Лин. Разработка методов и геометрических моделей анализа незаполненных пространств в задачах размещения. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: МАИ, 2011, - 24 с.