

# Применение метода функционально-воксельного моделирования на основе средств потенциальных полей к задачам поиска пути

П.А. Петухов,  
асп., [petuxowpawel@yandex.ru](mailto:petuxowpawel@yandex.ru),  
С.В. Додонов,

асп.,  
МГТУ «СТАНКИН», г. Москва,  
А.В. Толок,  
д.т.н., проф., зав. каф., зав. лаб., [atol@ipu.ru](mailto:atol@ipu.ru),  
МГТУ «СТАНКИН» и ИПУ РАН, г. Москва

В данной работе рассматриваются задачи поиска возможных вариантов построения трассы с помощью функционально-воксельного моделирования с применением принципов метода потенциалов, на примере сложных коммуникаций технических систем. На основе функционально-воксельного моделирования создается графическая среда трассировки, которая способствует формированию трассы от начальной до конечной точки, в обход статических препятствий. Принцип потенциальных полей позволяет динамически сканировать пространство с препятствиями для решения таких задач в слабо детерминированной среде.

In this study, we consider the problem of finding possible route variants with the help of functional-voxel modeling and the method of potential, in the case of complex communications in a technical system. On the basis of functional-voxel modeling, a graphic trace system is created, which forms the trace from the initial to the end point, bypassing obstacles, and also by the method of potential.

На сегодняшний день существует множество подходов для решения задач, связанных с поиском пути в детерминированной (заранее определённой) среде. В большинстве случаев они сводятся к задачам управления объектом, движущегося к цели. Использование различных подходов при построении трассы (или группы трасс) в зависимости от используемого метода предъявляет определённые требования. Так, к примеру, для построения оптимального маршрута мобильного робота можно использовать такие параметры, как «близость» к препятствию и величины, влияющие на выбор решения. Варьируя данными параметрами можно оптимизировать варианты решения для каждой конкретной ситуации. Метод, позволяющий получить такие результаты, использует потенциальные поля и называется метод «потенциалов» или «потенциальных полей». Алгоритм основан на использовании «притягивающего» и «отталкивающих» полей, в результате которого на каждом шагу рассчитывается потенциальное поле в текущем положении координат, а затем рассчитывается сила, индуцированная этим полем. Полученная сила определяет направление движущего объекта к назначенной цели. Метод характерен тем, что позволяет постоянно сканировать динамически изменяемую среду. Недостатком является временная зависимость работы алгоритма от количества препятствий в среде.

Метод, который позволяет более полно описать геометрические свойства объекта на компьютере является метод функционально-воксельного моделирования (ФВМ). Функционально-воксельное моделирование – графическое представление данных об объекте, которое использует аналитический способ описания моделей. ФВМ позволяет эффективно решать задачи связанные с прокладкой трасс с использованием статического (аналитического) описания объектов-препятствий. Добавление динамической составляющей метода потенциальных полей позволит эффективно строить маршрут для слабо детерминированных сред, где доступны к использованию сильные стороны обоих методов. Реализация данного подхода позволит привести к синтезу двух методов: метода «потенциалов» и метода ФВМ.

Задачами данной работы являются:

- разработка редактора препятствий, с использованием средств задания точек;
- разработка средств построения сцены препятствий, задающей пространство всех возможных трасс;
- задание поверхности конуса с вершиной в конечной точке маршрута;
- построение функционально-воксельной модели для решения задачи трассировки;
- определение всех возможных трасс с помощью метода потенциалов;
- построение трассы;
- создание системы моделирования аналитически описанных геометрически сложных объектов на основе их графического отображения;

В работе рассматриваются задачи поиска трасс с помощью ФВМ, на примере сложных коммуникаций в технической системе. Одним из примеров является двигатель самолета. Прокладкой коммуникаций в двигателе самолета занимается инженер-конструктор, с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР), таких как NX, CATIA, и т.д. [3]. На основе метода ФВМ разработана графическая система трассировки. Эта система формирует трассу от выбранной точки и до конечной точки в обход препятствий. А другой метод, который позволяет сканировать динамически среду, называется методом потенциалов.

В этом подходе, отличие от метода ФВМ заключается в том, что имея одну картину можно получить различные результаты трасс, т.к. в данном подходе препятствие и цель обладают неким потенциалом. На рисунке 1 демонстрируется функциональная модель IDEF0 системы, описывающая построение возможных трасс:

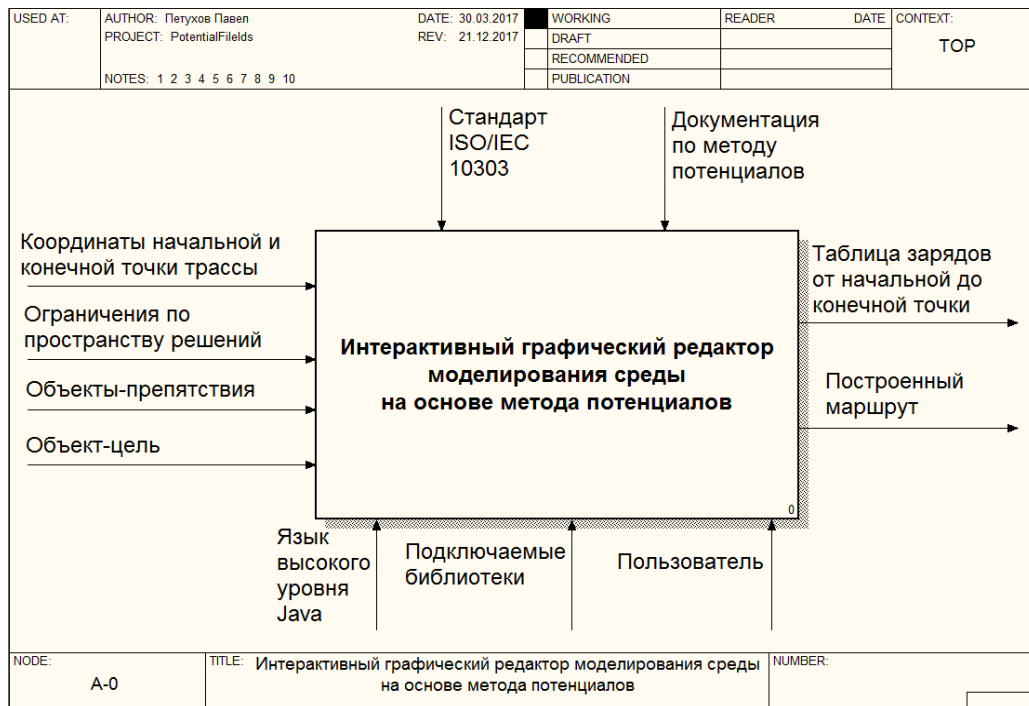


рис. 1 Функциональная модель интерактивного редактора

### Метод потенциальных полей

Вспомогательным средством для построения трассы в системе применяется метод потенциальных полей (potential fields). Традиционные подходы метода потенциальных полей создают притягивающее поле внутри цели. Потенциальное поле определяется через все свободное пространство, и на каждом временном шаге вычисляется потенциальное поле для текущего положения, а затем рассчитывается система индуцированных этим полем сил. Трасса прокладывается в соответствии с этой системой сил. Принцип работы метода представлен на рисунке 2.

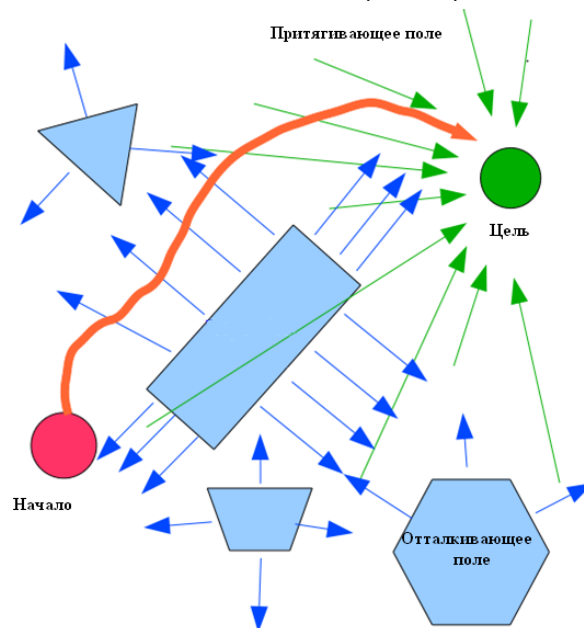


рис. 2 Притягивающие и отталкивающие поля

Для того чтобы построить трассу необходимо вычислить потенциал функции. Потенциал вычисляется по формуле:

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (1.1)$$

«Притягивающий» потенциал  $U_{att}(q)$  и его градиент определяется как функция от фактической конфигурации  $q$  и конфигурации цели  $q_{goal}$ .

$$U_{att}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \zeta d^2(q, q_{goal}), & d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^* \\ d_{goal}^* \zeta d(q, q_{goal}) - \frac{1}{2} \zeta (d_{goal}^*)^2, & d(q, q_{goal}) > d_{goal}^* \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\nabla U_{att}(q) = \begin{cases} \zeta(q - q_{goal}), & d(q, q_{goal}) \leq d_{goal}^* \\ \frac{d_{goal}^* \zeta(q - q_{goal})}{d(q, q_{goal})}, & d(q, q_{goal}) > d_{goal}^* \end{cases}, \quad (1.3)$$

где  $\zeta$  – коэффициент притяжения;  $d(q, q_{goal})$  – расстояние между текущим положением и положением цели;  $d_{goal}^*$  – пороговая функция, изменяющее свое значения для того, чтобы сбалансировать величину потенциала.

«Отталкивающий» потенциал  $U_{rep}(q)$  и его градиент определяется как функция расстояния  $D(q)$  от фактической конфигурации  $q$  и ближайшим препятствием [7].

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{D(q)} - \frac{1}{Q^*} \right)^2, & D(q) < Q^* \\ 0, & D(q) > Q^* \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{Q^*} - \frac{1}{D(q)} \right) \frac{1}{D^2(q)} \nabla D(q), & D(q) \leq Q^* \\ 0, & D(q) \geq Q^* \end{cases}, \quad (1.5)$$

где  $\eta$  – отталкивающий коэффициент;  $D(q)$  – расстояние между конфигурацией  $q$  и его ближайшим препятствием;  $Q^*$  – порог близости препятствий.

Потенциальное поле  $U(q)$ , вычисляется как сумма  $U_{att}(q)$  («притягивающий» потенциал) и  $U_{rep}(q)$  («отталкивающий» потенциал) [1].

Выше описывались общие подходы для получения потенциалов. Для того чтобы получить полную картину, нам необходимы формулы для перемещения в потенциальном поле и другие, которые влияют на построение трассы. Для этого были описаны формулы, которые используются для вычисления потенциала, перемещения, действующих сил и остальные компоненты.

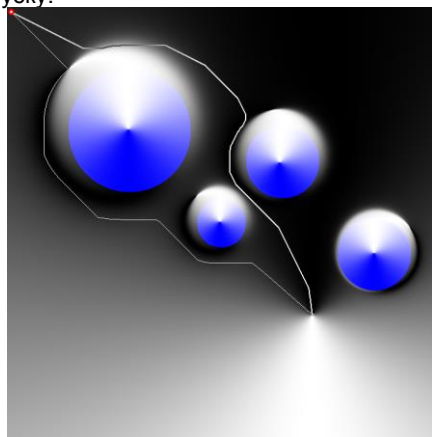
### Описание программного обеспечения для прокладки пути

Для динамичной работы системы в детерминированной среде применяется метод ФВМ [4]. Создан графический модуль для трассировки на двумерных функционально-воксельных моделях, который позволяет моделировать сцену, при этом автоматически формируя аналитического описания модели. Для моделирования объектов-препятствий используется интерактивная графическая подсистема компоновки замкнутых контурных объектов [2].

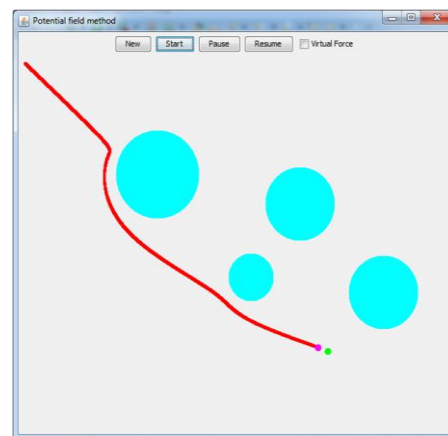
Базовым примитивом, с которым работает пользователь, является плоское положительное полупространство. Строится замкнутый контурный объект путем компоновки из нескольких полупространств [2].

Программа разработана на языке высокого уровня Java в среде Eclipse. Программный комплекс представляет собой среду для динамического и интерактивного построения пути к назначенной цели с учетом обхода препятствий. Построение трассы и препятствий осуществляется в компоненте *contentPane*.

Разработка осуществлялась на основе метода функционально-воксельного моделирования [5], который позволяет графически отобразить геометрическую информацию об объектах. Синтез двух методов (ФВМ и потенциальных полей) позволяет ускорить время расчёта динамического движения объекта к выбранной цели. При этом стационарные препятствия и цель описаны градиентной поверхностью, что позволяет двигаться к цели по градиентному спуску.



(а)



(б)

рис. 3 Построение трассы с использованием:  
а) — функционально-воксельного метода; б) — метода потенциалов.

### Идея создания метода ФВМ с использованием средств метода потенциалов

Динамические же препятствия подлежат постоянному мониторингу методом потенциальных полей. Разница в построении трассы с использованием функционально-воксельного метода без учета продемонстрирована на рисунке 3а, а с учетом потенциальных полей в разработанном приложении на рисунке 3б.

Данная идея заключается в модернизации существующего метода функционально-воксельного моделирования. Модернизация подразумевает собой добавление составляющих метода потенциалов, а именно динамическую среду. Используя данный подход можно перевести метод ФВМ к решению задач поиска пути не только статических объектов, а динамических. Если говорить более подробно, то метод ФВМ при этом должен строить поверхность, не только статическую, а динамически изменяемую. Примером тому может служить метод потенциалов, там при

добавлении нового препятствия меняется и движение самого объекта. Соответственно, при добавлении препятствия в метод функционально-воксельного моделирования нужно изменять и саму поверхность. Решение данной задачи может привести к тому, что мы сможем добавлять сколько угодно препятствий в любой момент времени, а вычисления при этом должны получаться быстро.

### **Идея создания воксельного вычислителя**

Функционально-воксельный метод также позволяет разрабатывать альтернативные способы решения задач моделирования [3]. В чем же может проявляться эта альтернатива? Можно уйти от традиционных координатных методов и перейти к понятию локальных геометрических характеристик. Координаты (x, y, z), которые несли свою геометрическую информацию о форме объекта в координатном методе, превращаются в обычную точку в пространстве, не несущую никакой информации о форме и лишь локализирующую геометрическую информацию в определенной точке пространства. При этом вся геометрическая информация о форме остается только в локальных геометрических характеристиках. Таким образом, как бы подменяется пространство «xyz» на пространство «ABCD», которое должно подвергаться геометрическим преобразованиям. К геометрическим преобразованиям пространства относятся операции сдвига, поворота и масштабирования модели. Принципы и алгоритмы геометрических преобразований для координатного метода описаны в работе [4]. Данный шаг позволит отказаться от «xyz» на определенном уровне, и тогда работа будет проводиться только с локальными геометрическими характеристиками, которые позволят изменять так и пространство функции, так и двигать вправо-влево, поворачивать, масштабировать функционально-воксельную модель в пространстве и т.д.

Для этого сначала потребуется создать математический аппарат, позволяющий определять локальные геометрические характеристики воксельной геометрической модели. Затем закодировать созданный математический аппарат и алгоритмы геометрических преобразований в процедуры автоматических вычислительных средств, коим и будет являться воксельный вычислитель. Разработка такого рода графического вычислителя позволит повысить эффективность обработки воксельных геометрических моделей за счёт ускорения выполнения геометрических преобразований.

### **Заключение**

Данный метод на сегодняшний день является молодым, по сравнению с методом потенциалов, и не проявил себя с полной силой. На основе метода потенциалов создается потенциальное поле, находящее внутри цели и препятствия, в результате чего рассчитывается общее потенциальное поле, и на основе его, на каждом шаге рассчитываем силу, действующую на движущий объект. И в зависимости от силы, движущий объект отталкивается на определенное расстояние, при приближении к препятствию, а затем притягивается в сторону цели, хотя можем отметить что притягиваться он начинает с начального шага, но сила притяжения может быть небольшая, так как еще все зависит от расстояния до цели, а также от количества препятствий и от величины интенсивности каждого из них.

С помощью метода функционально-воксельного моделирования можно моделировать сцены различной сложности, что является основным преимуществом, где в отношении с методом потенциалов он выигрывает, так как в методе потенциалов сложность вычисления зависит от размера величины интенсивностей, а так же от количества препятствий. А в методе функционально-воксельного моделирования все превращается в поверхность, где затем на основе градиентного метода анализируется поверхность и прокладывается столько маршрутов, сколько возможно.

Существуют такие задачи, где метод функционально-воксельного моделирования на данный момент бессилен. Данные задачи основаны на обходе препятствий с динамической структурой, которые в определенный момент времени могут изменить свое направление. Такие среды можно назвать недетерминированные, так как неизвестно как поведет себя препятствие спустя некоторое время. С помощью метода потенциалов реализация данного подхода возможна, но довольно трудоемка, так как из-за изменения положения препятствия будет происходить пересчет всей рабочей области.

Таким образом, нужно свести задачу поиска пути в динамических средах в синтезе двух методов: метода потенциалов, имеющий динамическую структуру, и метод функционально-воксельного моделирования, использующий градиентный подход для обхода пути. Реализация нового подхода позволит решать все те задачи, которые требуют максимальной готовности, чтобы обойти движущее препятствие. Полученная структура может получить такое название, как метод функционально-воксельного потенциала.

### **Литература**

1. Wilschut T. An obstacle avoidance algorithm for a mobile robot based upon the potential field method. // Eindhoven: University of Technology. 2011. P. 6-8.
2. Додонов С.В., Локтев М.А., Петухов П.А., Толок А.В. «Интерактивная система создания и компоновки функционально-воксельных моделей для решения задачи поиска пути градиентным методом». Вестник МГТУ "Станкин" №3 (38). Москва.: МГТУ "Станкин", 2016 г. С. - 66-69.
3. Толок А.В. «Функционально-воксельные вычисления на компьютере». Труды 26-й Международной научной конференции GraphiCon2016. Н. Новгород: ИФТИ, ННГАСУ, 2016. С. 1-8.
4. Толок А.В. «Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании». Под ред. академика РАН С.Н.Васильева. - Москва. ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 112 с., ISBN: 978-5-9221-1680-0
5. Толок А.В., Локтев М.А. «Функциональный принцип обхода препятствий с применением метода функционально-воксельного моделирования» //Вестник МГТУ "Станкин" №1 (36). Москва.: МГТУ "Станкин"., 2016 г. С. - 75-80.
6. Петухов П.А. Компоновка среды с помощью функционально-воксельного моделирования для задачи поиска методом потенциалов //Материалы международной студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2016)». Сборник тезисов. – М: МГТУ «Станкин», 2016.
7. Додонов С.В., Петухов П.А. Компоновка и хранение функционально-воксельных геометрических моделей с помощью интерактивной графической системы для задачи поиска пути методом потенциалов //Материалы международной студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2017)». Сборник тезисов. – М: МГТУ «Станкин», 2017.