

УДК 519.876.5

Алгоритм формирования сети технологических дорог виртуальной модели карьера

Лобачёв Иван Витальевич

lobivit@bmstu.ru
SPIN-код: 1542-2456

Масленников Андрей Леонидович

amas@bmstu.ru
SPIN-код: 7087-6303

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен алгоритм формирования сети технологических дорог в карьере для отладки алгоритмов управления и навигации беспилотных грузовых транспортных средств. Предлагаемый алгоритм основан на формировании дерева технологических дорог в карьере, состоящего из набора случайно генерируемых точек и связывающих их геометрических соотношений, определяющих взаимное положение соседних участков. Для получения плавных переходов между соседними участками технологических дорог и привязки полученной сети технологических дорог к физическому масштабу карьера применяется билинейная интерполяция. Для получения более гладких переходов между горизонтальными и наклонными сегментами технологических дорог, а также менее отвесных обрывов применено гауссово размытие. Реализация алгоритма показала его работоспособность.

Ключевые слова: алгоритм генерации дорог, беспилотное грузовое транспортное средство, виртуальный карьер, билинейная интерполяция, гауссово размытие

Algorithm for forming a network of technological roads of a virtual quarry model

Lobachev Ivan Vitalievich

lobivit@bmstu.ru
SPIN-code: 1542-2456

Maslennikov Andrey Leonidovich

amas@bmstu.ru
SPIN-code: 7087-6303

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The algorithm for forming a network of technological roads in a quarry for developing control and navigation algorithms of unmanned ground cargo vehicles has been considered. The proposed algorithm is based on the formation of a tree of technological roads in the quarry, consisting of a set of randomly generated points and the geometric relationships that connect them, determining the relative positions of neighboring sections. To achieve smooth transitions between technological roads sections and to tie the resulting network of technological roads to the physical scale of the quarry, bilinear interpolation is used. For smoother transitions between horizontal and inclined segments of the technological roads and quarry environment, as well as less steep cliffs, Gaussian smoothing has been applied. The implementation of the algorithm demonstrated its applicability.

Keywords: simulation modeling, unmanned ground vehicle, road network generation, bilinear interpolation, Gaussian filter

Введение. Для разработки и отладки алгоритмов прокладки маршрута для организации движения беспилотных грузовых транспортных средств (БГТС) в карьере необходимо иметь пространственное представление окружения карьера, отражающее основные его характеристики: форму, уклоны, обрывы, ширину проезжей части и др. [1]. В общем случае это окружение может быть произвольной конфигурации и разветвленным. Ранее авторами [2] был предложен алгоритм генерации технологической дороги карьера в виде одиночной спирали, спускающейся с заданным углом наклона, но без ветвления, т. е. без возможности формирования сети технологических дорог. В данной работе предлагается модификация этого алгоритма позволяющая генерировать разветвленную сеть технологических дорог в карьере со структурой дерева, с обозначенной связью между родительским и дочерними сегментами. Каждый сегмент формируется срединной линией — отрезком, а затем дополняется двумя другими отрезками параллельными срединной линии, которые формируют пространственную плоскость, соответствующую участку (сегменту) технологической дороги.

Материалы и методы. Формирование сети технологических дорог начинается с генерации дерева родительских и дочерних сегментов. Затем для определения геометрии соединения родительских и дочерних сегментов используются подходы аналитической геометрии, направленные формирование неразрывных соединений сегментов транспортных дорог. Затем задается координатная сетка с физическим масштабом, для сопоставления с которой сгенерированного дерева технологических дорог с учетом высоты сегментов применяется билинейная интерполяция. На заключительном этапе для сглаживания переходов между сегментами и уменьшения резкости обрывов применяется гауссово размытие. Предложенный подход может быть описан следующим алгоритмом:

- задается срединная линия начального сегмента — отрезок длиной L_0 с концами A_0 и B_0 на плоскости, который на первой итерации становится единственным элементом множества родительских сегментов первого поколения;
- родительский сегмент дополняется правой и левой границами технологической дороги как отрезками той же длины, параллельными срединной линии и отстоящими от нее на расстоянии $d/2$ желаемой ширины дороги;
- для родительского сегмента с заданной вероятностью p_0 (равномерного закона распределения) генерируется два дочерних сегмента, а с вероятностью $(1 - p_0)$ — один;
- угол α_1 между направлением родительского сегмента и первым дочерним сегментом генерируется как случайная величина, распределенная по нормальному закону, параметры которого являются входными параметрами алгоритма;
- определяется координата B_1 конца срединной линии каждого дочернего сегмента, начало A_1 которого совпадает с концом родителя B_0 , длиной $L_1 = kL_0$ (k — заданный коэффициент уменьшения длины сегмента нового поколения) и полученным ранее углом α_1 путем решения системы управле-

ний, составленных на базе скалярного и векторного произведений векторов $\overline{A_0B_0}$ родительского и $\overline{A_1B_1}$ дочернего сегментов [2, 3];

- каждый дочерний сегмент дополняется правой и левой границами, аналогично подходу, описанному ранее для родительского сегмента;

- проводится проверка пересечения срединной линии и границ полученных дочерних сегментов с любым другим сегментом, кроме своего родителя и брата. При обнаружении пересечения шаги 4–6 алгоритма повторяются с новым случайным углом α_1 . После K неудачных попыток считается, что у родителя нет дочерних сегментов, и алгоритм переходит к следующему родителю, и пункты 3–7 алгоритма повторяются;

- после построения всех дочерних сегментов формируется непрерывный контур технологической дороги путем соединения границ родительского и дочернего сегментов на основании поиска точек пересечения соответствующих отрезков, методом, описанным в работах [2, 4]. Левая граница родительского сегмента соединяется с левой границей левого дочернего сегмента в точке их пересечения, правая граница родительского сегмента соединяется с правой границей правого дочернего сегмента в точке их пересечения, правая граница левого дочернего сегмента и левая граница правого дочернего сегмента соединяются между собой в точке их пересечения;

- если в множестве родительских сегментов не осталось необработанных сегментов, то текущий набор дочерних сегментов становится родительским, формируется новое множество родительских сегментов (новое поколение сегментов) и для него выполняются пункты 3–7. Если уже рассмотрено изначально заданное максимальное число поколений N , то рассмотренное поколение считается последним и выполняется переход к следующему пункту;

- контур дороги разбивается на прямоугольные участки и примыкающие площадки, обходя сегменты по поколениям — от родительских к дочерним. У прямоугольных участков высота изменяется от начального к конечному, а у примыкающих площадок, которые считаются узловыми, высота считается постоянной. Формирование прямоугольных участков осуществляется за счет опускания перпендикуляров от меньших по длине сторон соответствующего сегмента на наибольшие (по [2, 6]), как показано на рис. 1;

- значение высоты конца каждого сегмента определяется как:

$$H_i = H_{i-1} - L \tan \theta_{\max i \min},$$

где H_{i-1} — значение высоты начала родительских сегментов, м; $\theta_{\max}$ — максимальный допустимый угол наклона дороги, рад; $L_{i \min}$ — минимальное значение длины сегмента спуска (отрезка BC) среди текущего поколения родительских сегментов, м. Высота в площадках равна высоте конца родительского сегмента. Высота начала дочернего сегмента принимается равной высоте площадки родительского сегмента;

- после генерации сети технологических дорог, определяются размеры карты, на которой, согласно заданному физическому масштабу (разрешению), определяется интерполяционная сетка. После этого выполняется били-

нейная интерполяция [2, 7] для определения высот точек дороги с привязкой к координатам интерполяционной сетки;

– на заключительном этапе к полученной на предыдущем шаге матрице высот (поверхности карьера и сети технологических дорог) применяется фильтрация гауссовским размытием. Благодаря размытию сглаживаются переходы между сегментами, соответствующими участкам спусков и подъемов и площадок.

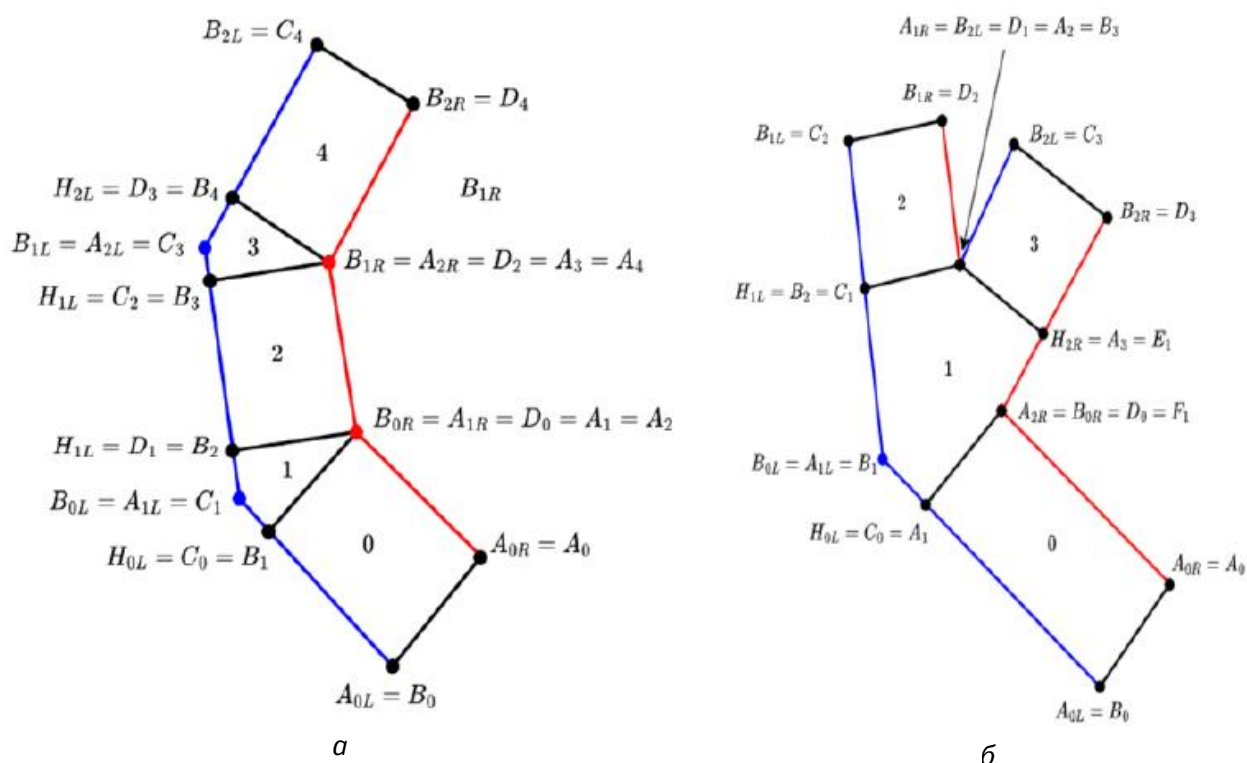


Рис. 1. Обработка пересечения двух (а) и трех дорог (б)

Результаты. В результате реализации алгоритма получена древовидная сеть технологических дорог карьера (рис. 2). Участки дорог имеют наклон, не превышающий максимального заданного значения.

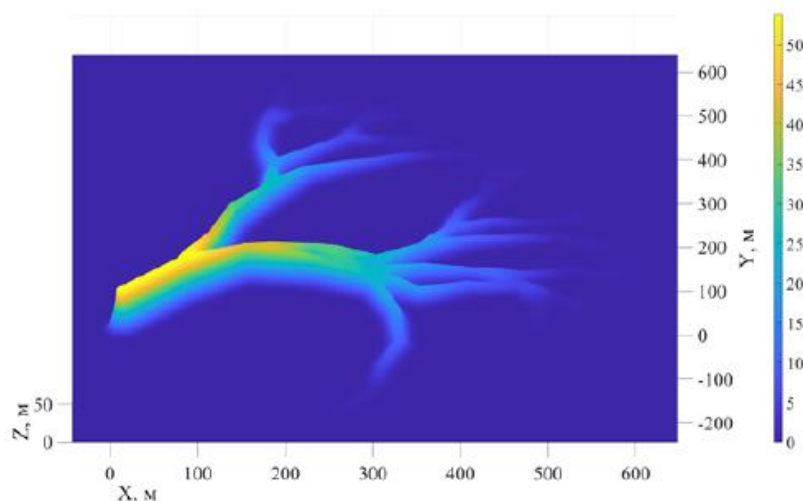


Рис. 2. Сгенерированное дерево путей

Обсуждение полученных результатов. Предложенный алгоритм позволил выполнить генерацию сети технологических дорог в виде дерева. Гауссово размытие позволило сделать обрывы между дорогой и окружающим ландшафтом с плавными переходами. Недостатком алгоритма является использование механизма связи соседних сегментов как родительского и дочернего, что лишает возможности генерировать сети технологических дорог с произвольной конфигурацией.

Заключение. В работе предложен алгоритм построения профиля сети технологических дорог карьера. Алгоритм состоит из следующих этапов: формирование узлов отдельных сегментов дорог, построение границ дорог, разделение дорог на сегменты, определение координатной сетки, определение высоты в точках сетки, принадлежащих дороге, при помощи билинейной интерполяции, сглаживание полученного пространственного представления при помощи гауссова размытия. Результаты реализации алгоритма показали, что полученная сеть технологических дорог карьера визуально обладает необходимым видом для ее применения к моделированию виртуального карьера в задачах проектирования маршрутов БГТС в карьерах.

Список источников

- [1] Лобачев И.В., Масленников А.Л. Моделирование работы двухмерного лидара для применения в задачах управления движением наземных транспортных средств в карьере. *XLVIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сб. тез.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, т. 2, с. 514–517.
- [2] Лобачев И.В., Масленников А.Л., Пчелинцев В.Э. Алгоритм формирования трассы для имитационной модели движения карьерного транспортного средства. *Автоматизация. Современные технологии*, 2024, т. 78, № 4, с. 152–157. <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2024-78-4-152-157>
- [3] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. Москва, Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986, 544 с.
- [4] Берг М. *Вычислительная геометрия. Алгоритмы и приложения*. Москва, ДМК Пресс, 2017, 437 с.
- [5] Ильин В.А. *Линейная алгебра и аналитическая геометрия*. Москва, Изд-во МГУ, 2007, 394 с.
- [6] Шишкин А.В., Боресков А.В. *Компьютерная графика. Полигональные модели*. Москва, ДИАЛОГ-МИФИ, 2001, 464 с.
- [7] Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*. New York, Cambridge university press, 1992, pp. 123–128.