



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • [Электронная библиотека](#)

[Препринты ИПМ](#) • [Препринт № 127 за 2020 г.](#)



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**В.В. Павловский,
А.В. Подпросветов,
Е.В. Павловский**

Методы и алгоритмы
локальной навигации
автономных автомобилей на
многополосной дороге,
архитектура симуляции

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Павловский В.В., Подпросветов А.В., Павловский Е.В. Методы и алгоритмы локальной навигации автономных автомобилей на многополосной дороге, архитектура симуляции // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2020. № 127. 17 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-127>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-127>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

В.В. Павловский, А.В. Подопросветов, Е.В. Павловский

Методы и алгоритмы локальной
навигации автономных автомобилей
на многополосной дороге, архитектура
симуляции

Москва – 2020

УДК 531.1

***В.В. Павловский, А.В. Подопросветов, Е.В.Павловский* Методы и алгоритмы локальной навигации автономных автомобилей на многополосной дороге, архитектура симуляции**

В данной работе описана система моделирования движения на многополосной дороге, предназначенная для отработки алгоритмов перестроения автономного автомобиля «Нива» со съёмной системой автоматического управления. Приведен обзор методов и алгоритмов о принятии решений по перестроениям системой управления автономным автомобилем на многополосной дороге. Предложены методы принятия решений о перестроениях, без проезда перекрестков. Представлено описание симулятора и анализ данных экспериментов при отработке алгоритма.

Ключевые слова: Компьютерный симулятор, система управления, автономный автомобиль, робоавтомобиль, смена полосы движения.

***V. V. Pavlovsky, A. V. Podoprosvetov, E. V. Pavlovsky.* Methods and algorithms for local navigation of autonomous vehicles on a multi-lane road, simulation architecture**

This paper describes a system for modeling traffic on a multi-lane road, designed to work out the lane changing algorithms for an autonomous car «Niva» with a removable automatic control system. A survey of such algorithms on a multi-lane road is given. Methods for making decisions on changing the lane without crossing intersections are proposed. In this work the description of the simulator and the analysis of experimental data for the algorithm are presented.

Key words: Computer simulator, control system, autonomous car, robotic car, lane change .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ: 18-07-00127, 19-01-00123, 19-08-01159).

Содержание

Введение	3
1. Общая архитектура системы «АвтоНива»	6
2. Моделирование перестроений для «АвтоНивы»	8
3. Структура модели	9
4. Результаты тестов	11
5. Результаты моделирования и перспективы развития	12
6. Заключение	13
Список литературы	14

Введение

За последнее десятилетие произошел прорыв в разработке автономных транспортных средств на мировом уровне. Из области теоретических исследований автоматическое вождение перешло в практическую область и даже в коммерчески реализуемые проекты. В частности, можно отметить автопилот компании Tesla, предлагаемый ею в составе одноименных автомобилей, а компания Waymo уже несколько лет тестирует автоматические автомобили в роли такси. Из аналогичных российских разработок необходимо отметить Яндекс, запустивший проект автоматического такси в городе Иннополис и планирующий начать эксплуатацию в Москве, а также разработки КАМАЗа.

В то же время существующие системы еще не дошли до уровня полноценного автоматического водителя, способного полностью взять на себя управление транспортным средством в любых дорожных ситуациях. Упомянутый автопилот Tesla является, по сути, развитой системой круиз-контроля, умеющей придерживаться полосы движения и поддерживать безопасные расстояния до соседних автомобилей. Проекты аналогичного уровня предлагают и другие производители автомобилей; но более сложное движение в транспортном потоке, перестроения на многополосных дорогах, до сих пор остаются вызовом для современных систем, и поэтому многие исследования посвящены именно этой задаче.

В частности, в работе [1] автором (Gipps P.G.) предложена модель смены полосы движения, которая учитывает влияние таких параметров, как риск при смене полосы движения, расстояния до препятствий и изменяющиеся желания участников. Для каждого критерия было разработано правило, позволяющее различать факторы, влияющие на поведение при смене полосы движения. В дальнейшем, в работе [2] построена модель смены полосы движения, которая учитывает частоту смены, на основе модели Gipps, что внесло в модель случайную ошибку. Поведение в этой модели при смене полосы движения было разделено на четыре этапа: целесообразности смены полосы движения, выбор целевой полосы движения, поиск подходящего места и реализация поведения при смене полосы движения. Позднее в работе [3] была предложена модель MOBIL (минимизация общего торможения, вызванного сменой полосы движения), которая учитывает управление ускорением.

Самая большая опасность при перестроении заключается в возможном столкновении. В работе [4] вероятность столкновения уменьшалась за счет вычисления времени TTC (time-to-collision) и планирования траектории уклоняющегося маневрирования. В исследовании [5] изучено влияние параметров транспортного потока, связанных с индивидуальным поведением водителей

при смене полосы движения и следовании за автомобилем, на возникновение бокового и заднего столкновений на автострадах.

Для повышения точности поведения при смене полосы движения используются различные модели, такие как байесовская модель, скрытая Марковская модель (НММ) и метод опорных векторов (SVM). Модель, основанная на динамических байесовских сетях, предложена в работах [6, 7]. Решение о смене полосы движения принималось с использованием байесовских графов решений, и байесовская сеть служила для учета неопределенности измерения в процессе принятия решений. Дополнительное вычисление ожидаемой полезности при смене полос, которая вычисляется по энтропии Шеннона, предложено в работе [8]. В работах [9, 10] авторами разработан алгоритм для определения намерения смены полосы движения с помощью байесовской методологии обучения на основе заданного множества траекторий движения. В работе [11] построена модель НММ для определения поведения при смене полосы движения с использованием различных данных [12–15]. В работе [16] построена прогнозируемая траектории движения транспортного средства во время смены полосы движения на основе метода опорных векторов (SVM) с использованием данных симулятора Next Generation Simulation (NGSIM) [17].

В настоящее время глубокое обучение и нейронные сети применяются для определения поведения при смене полосы движения, учитывающего влияние факторов неопределенности ситуации на дороге. Для прогнозирования намерения о смене полосы в работах [18, 19] авторами используется метод опорных векторов для расчета входных данных байесовского фильтра, а выходные данные байесовского фильтра используются для окончательного прогнозирования. В работе [20] модель поведения при смене полосы движения построена с использованием байесовской сети, а точность модели повышается за счёт использования машинного обучения. Авторы работы [21] адаптировали модель глубокого обучения и нейронную сеть с слоем LSTM для анализа возможности следования за автомобилем и смены полосы движения и построения соответствующих траекторий. Усовершенствованная модель глубокого обучения, предложенная в работе [30], используется для прогнозирования поведения при смене полосы движения с учетом особенностей дорожного движения, параметров транспортных средств и движений водителя. В [31] разработаны динамические модели, которые лучше соответствуют реальным траекториям смены полосы движения и могут генерировать более точные траектории при смене полосы движения. В работе [32] разработана нечеткая нейронная сеть для предсказания желаний водителей о смене полосы движения.

Существуют подходы [5] к решению задач перестроения, где все транспортные средства имеют канал связи через локальную инфраструктуру, т.е.

узел связи между транспортными средствами и инфраструктурой (V2I), позволяющий транспортным средствам обмениваться информацией о динамике, например [5]. В работе [33] авторы представили модель смены полосы движения, основанную на теоретико-игровом подходе, который эндогенно учитывает поток информации в подключенной автомобильной среде. В работе [22] каналы V2I также используются для распределения между транспортными средствами порядка движения. Работа [22] исследует влияние частоты и продолжительности естественных смен полос движения на уровень аварийности. В исследованиях [23, 24] использованы параметры, извлеченные из данных о траекториях транспортного средства, для количественной оценки риска события смены полосы движения на автостраде, с использованием данных симулятора (NGSIM).

Заметим, что существуют подходы для предсказания траектории смены полосы движения, основанные на физических свойствах автомобиля при маневрировании [25]. В работе [26] построена модель смены полосы движения, учитывающая характеристики водителей. Кроме того, авторы [27] исследовали применение теории клеточных автоматов в принудительном поведении при смене полосы движения.

В данной работе описана методика моделирования движения на многополосной дороге, предназначенная для отработки алгоритмов перестроения автономного автомобиля «Нива» со съемной системой автоматического управления. Проект системы автоматического управления на основе автомобиля «Нива» развивается авторами уже несколько лет [28, 29], и на предыдущих этапах были разработаны системы технического зрения и управления движением, обеспечивающие распознавание окружающих машин и дорожной разметки и движение в полосе. Задача выполнения перестроений является следующим естественным шагом; но для детального исследования поведения различных вариантов алгоритмов и сбора достаточных объемов статистики для оптимизации управления потребовалась имитационная программа дорожных ситуаций (симулятор), которая и представлена в данной работе.

Отметим, что в настоящей версии симулятор ориентирован в основном на принятие решений о перестроении и отработку соответствующих алгоритмов. Точное моделирование кинематики и динамики движения для тестирования и развития алгоритмов построения траекторий планируется как следующий шаг в развитии симулятора.

1. Общая архитектура системы «АвтоНива»

Для робоавтомобиля «Нива», изображенного на рисунке 1.1, разработана архитектура многоуровневой системы управления (рис.1.2). Система управления автомобилем состоит из трех уровней. На нижнем уровне решается задача об отработке заданных траекторий движения, т.е. выдается управляющий сигнал на органы управления. На среднем уровне после решения задач локализации и навигации генерируется конкретная траектория. На верхнем уровне решается задача планирования маршрута движения до целевой точки.



Рис. 1.1: Общий вид «АвтоНивы».

Информация о дороге в реальном времени поступает с видеокамер, расположенных на автомобиле, затем происходит распознавание разметки, автомобилей на дороге и знаков алгоритмом, предложенным в статьях К.И.Кия [34, 35]. Далее происходит построение траектории движения и формирова-

ние последовательности управляющих сигналов для приведения в действие органов управления автомобилем.

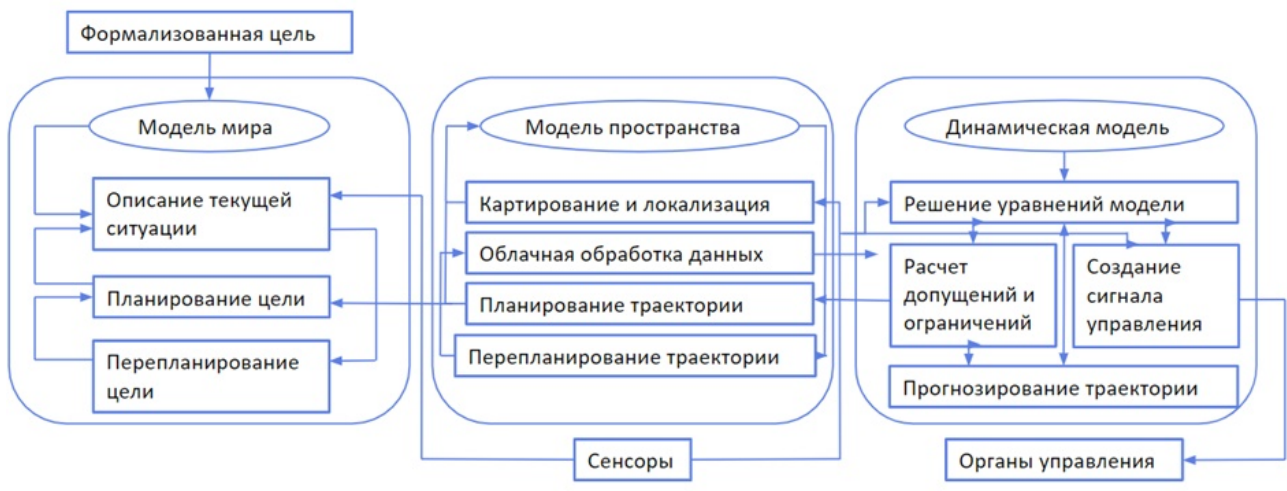


Рис. 1.2: Архитектура Нивы.

Кроме того, возможно движение по дороге без разметки. В этой ситуации, траектория строится вдоль распознаваемых краев дороги если таковые имеются, а в случае наличия нескольких пересекающихся дорог используется эмпирический алгоритм достижения заданных координат.

Система автономного автомобиля включает в себя несколько модулей: обработку показаний датчиков; привязку к локальной системе координат, системы картирования и локализации (GPS и карта); планировщик задач; планировщик маршрутов; планировщик действий; планировщик траекторий; контроллеры слежения и управления исполнительными механизмами низкого уровня. Набор датчиков, таких как LiDAR, радары, камеры, предоставляют информацию об окружающей среде в режиме реального времени. Другие датчики, такие как GPS в сочетании с инерциальным измерительным блоком (IMU) и датчиками угловых скоростей, используются для получения приблизительной информации о местонахождении автомобиля. Сенсорная информация в основном применяется для системы восприятия, т.е. для обнаружения разметки полос движения, светофоров, а также статических и динамических объектов (например, пешеходов, велосипедистов и транспортных средств).

Система компьютерного зрения построена на основе глобального анализа кадров, применяющего метод геометризованных гистограмм для сегментации и описания цветных изображений [34, 35]. Данный метод позволяет строить в реальном времени специальное сжатое содержательное описание каждого кадра видеопоследовательности, которое позволяет решать задачи понимания изображений без дальнейшего обращения к пиксельным массивам. Глобальный анализ кадра делает возможным построение систем понимания

изображений для поиска больших и малых объектов.

Программная система управления (ПСУ) (рис.2.1) состоит из двух приложений. Приложение нижнего уровня работает на микроконтроллере STM32 Cortex-M4 (168MHz) и отвечает за формирование управляющих сигналов для управления двигателями DC, BLDC, Step motor и обеспечение их точного позиционирования. Высокоуровневое приложение на архитектуре x86, написанное на C++, осуществляет обработку видео, распознавание разметки, построение траектории и формирование сигналов высокого уровня (тронуться, остановиться и т.д.).

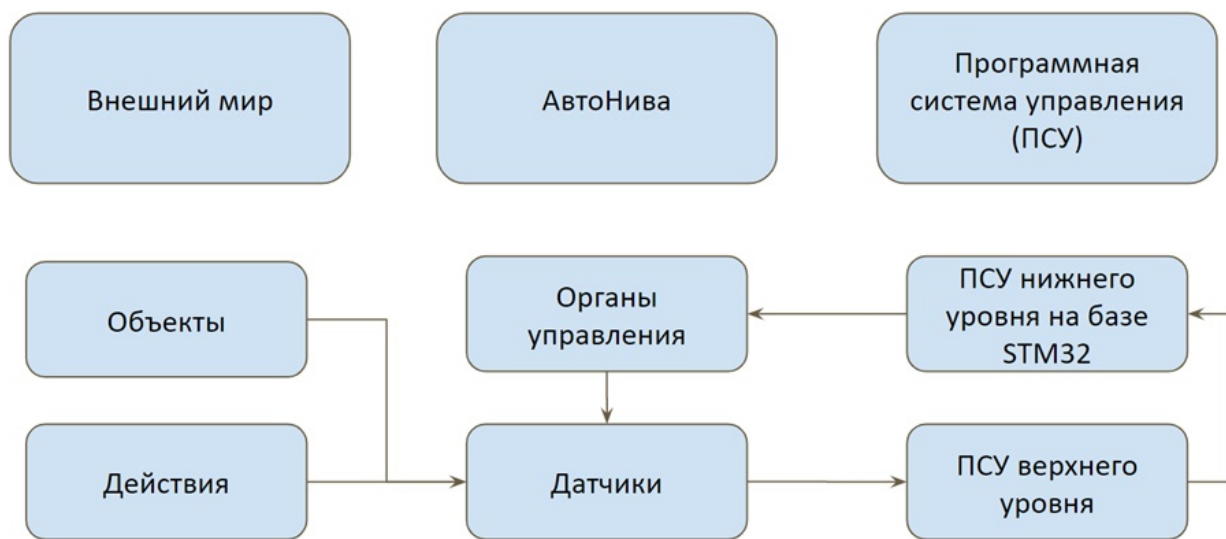


Рис. 1.3: Диаграмма потоков информации.

Проекта «АвтоНива» предполагает создание алгоритма принятия решений о перестроении на многополосной дороге. С этой целью была разработана программа компьютерного моделирования способов перестроения в различных дорожных ситуациях. На данный момент автоматические перестроения описываются списком правил, представленным в пункте 3.

2. Моделирование перестроений для «АвтоНивы»

В основу программы моделирования перестроений был заложен симулятор дорожного движения на многополосной развязке [36]. Симулятор демонстрирует правдоподобное поведение автомобилей, успешно воспроизводя ряд эффектов, свойственных реальному дорожному движению (например, возникновение пробок при большой интенсивности движения).

В то же время существенно, что он реализует так называемое микро-моделирование, то есть, отслеживает поведение отдельных автомобилей (в

отличие от макро-моделей, использующих для транспортного потока модели сплошной среды). Более того, следуя стайной парадигме, моделируется самостоятельное принятие решений водителем каждого автомобиля на основании индивидуально присваиваемых параметров (например, реальной скорости движения). Таким образом, эта модель оказалась вполне подходящей для исследования и отработки поведения и принятия решений для конкретного автомобиля.

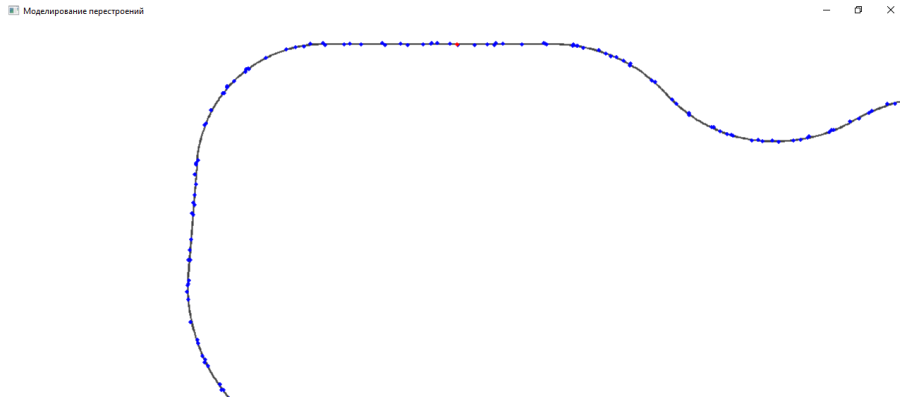


Рис. 2.1: Внешний вид окна симулятора, демонстрирует, что повороты дороги на 90° и более возможны.

Основным изменением в симуляторе был перенос фокуса моделирования с дороги на автомобиль. В работе [36] при моделировании автомобильной развязки рассматривался фиксированный дорожный узел, через который проходят автомобили, случайно генерируемые на въезде и убираемые на выезде. В отличие от этого, симулятор, предназначенный для отработки поведения одного автомобиля как бы следует за этим автомобилем, перемещаясь вдоль (потенциально бесконечной) дороги. Остальные же автомобили по-прежнему генерируются случайно и следуют отработанным моделям, создавая для исследуемого автомобиля окружающую среду.

3. Структура модели

Дорога моделируется как состоящая из сегментов, которые в настоящее время могут быть двух типов: отрезки прямых и дуги окружностей. При этом в каждый момент времени моделируется участок дороги длиной в десять сегментов, пять позади моделируемой машины и пять впереди. По мере движения оставшиеся далеко позади сегменты удаляются из памяти модели (вместе с оставшимися на них машинами), а впереди добавляются новые сегменты (с новыми случайными автомобилями). Таким образом, виртуальная дорога является потенциально бесконечной.

Технически новые добавляемые сегменты случайно генерируются либо как отрезки прямых длиной 500–1200 метров, либо как дуги окружностей радиусом 500–1000 метров длиной $\pi/8$ – $\pi/2$. При необходимости эти параметры можно изменять, как и количество моделируемых сегментов и число полос на дороге. Также возможно добавление новых типов сегментов.

С другой стороны, следуя схеме, использованной в симуляторе дорожного движения, дорога рассматривается как совокупность отдельных параллельных полос, и автомобили привязываются к этим полосам. Каждая полоса реализуется как двусвязный список, определяющий последовательность автомобилей. Кроме этого, каждому автомобилю ставится в соответствие непрерывно изменяющаяся координата вдоль полосы и скорость движения. При этом скорость движения каждой машины ограничивается скоростью впереди идущей машины: при приближении автомобиль начинает снижать скорость, пока на некотором заданном пороговом расстоянии она не станет равной скорости идущей впереди машины.

При перестроениях автомобиль считается занимающим две полосы сразу, ограничивая движение машин в обеих полосах (и сам ограниченный идущими впереди машинами в обеих полосах). Технически, сначала автомобиль добавляется в соответствующее место в списке новой полосы, а по завершении маневра удаляется из списка старой.

При этом следует отметить, что система моделирует движение машин по такой схеме, но при этом оставляет принятие решений о перестроении «на усмотрение каждой машины», вызывая соответствующую функцию. Таким образом, возможно проверять и отрабатывать различные алгоритмы перестроения, а также задавать разные алгоритмы для различных автомобилей, оставаясь в рамках общей схемы моделирования.

В настоящее время используемый метод принятия решения предполагает получение ответов на два вопроса: *хотим* ли мы перестроиться и *можем* ли мы перестроиться. Систему принятия решений в зависимости от дорожной ситуации можно расширять и дорабатывать независимо.

В основу положены следующие соображения:

- автомобиль решает, что *хочет* перестроиться влево, если он догнал более медленный автомобиль, который не дает ему двигаться с желаемой скоростью;
- автомобиль решает, что *хочет* перестроиться вправо, если его догнал автомобиль с большей желаемой скоростью, который желательно пропустить;

- при этом автомобиль *может* перестроиться, если на соответствующей параллельной полосе свободен необходимый промежуток. Технически, если координата автомобиля вдоль полосы X , на соседней полосе должен быть свободен промежуток $[X - A; X + B]$, где A и B – определенные пороги. В настоящее время они заданы константами (дорога должна быть свободна на 10 метров вперед и назад), но рассматривается идея сделать их зависимыми как от дорожной ситуации (например, на большей скорости требуется больший свободный промежуток), так и от «характера» водителя (для окружающих автомобилей – параметра, случайно выбираемого при генерации автомобиля для моделирования разных стилей вождения разных водителей в соседних машинах).

4. Результаты тестов

Результаты моделирования приведены в таблице ниже.

<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>
150 – 200 м	99.863 км/ч	153 / 154	1,42% / 0,60%	0 (99)
100 – 150 м	99.740 км/ч	184 / 184	2,95% / 1,27%	0 (170)
70 – 100 м	99.465 км/ч	211 / 214	5,91% / 3,57%	0 (536)
50 – 70 м	98.811 км/ч	209 / 212	3,70% / 4,32%	0 (1454)
40 – 60 м	98.502 км/ч	183 / 183	6,20% / 6,99%	1 (2287)
30 – 50 м	97.676 км/ч	167 / 169	7,31% / 7,86%	5 (4681)
20 – 35 м	93.779 км/ч	156 / 156	10,65% / 9,46%	9 (11773)
15 – 25 м	90.127 км/ч	92 / 95	15,64% / 19,91%	10 (12489)
12 – 18 м	84.872 км/ч	58 / 58	21,11% / 13,57%	17 (31984)

Моделировалось десять часов виртуального времени, в течение которых машина ехала с желаемой скоростью 100 км/ч и должна была проехать 1000 км.

В столбце *I* приведен параметр моделирования — расстояние между вновь создаваемыми машинами. Уменьшение этого расстояния приводит к повышению плотности транспортного потока.

В столбце *II* показана фактическая средняя скорость движения. В столбце *III* приведено число совершенных за десять часов перестроений влево и вправо. В столбце *IV* показано, какой процент времени «Нива» ожидала возможности перестроения (появления просвета в соседнем ряду), соответственно, влево и вправо. В столбце *V* приведено число резких торможений, спровоцированных Нивой при перестроениях; в скобках приведено общее количество

резких торможений, спровоцированных всеми автомобилями в процессе моделирования.

Таблица позволяет заметить следующие закономерности: по мере роста плотности движения число перестроений сначала возрастало; однако ожидание перестроений занимало совсем небольшой процент времени, и средняя скорость движения снижалась незначительно.

По мере увеличения плотности транспортного потока ожидание возможности перестроений стало занимать значительную долю времени. В результате фактическое число перестроений значительно снизилось, а также значительно снизилась средняя скорость, зато возросло количество спровоцированных резких торможений.

5. Результаты моделирования и перспективы развития

На рисунке показан общий вид окна визуализации работы программы моделирования 5.1, «Нива» (выделена красным) находится в процессе перестроения, окружающие машины рисуются синими.

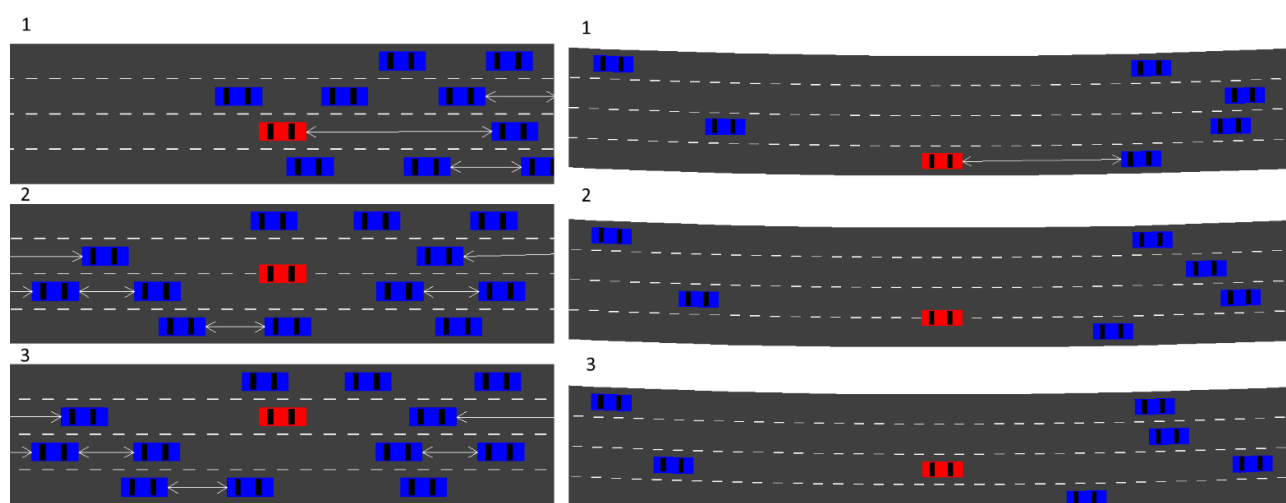


Рис. 5.1: Работа алгоритма перестроения автомобиля в потоках разной плотности.

В результате моделирования получено вполне правдоподобное движение дорожного потока и удовлетворительное поведение основного отработываемого автомобиля, с перестроениями в ожидаемые моменты. В то же время замечены определенные недостатки; например, иногда автомобиль перестраивается в соседнюю полосу и сразу решает вернуться обратно, поскольку условия в новой полосе его не устраивают, но существующая система принятия решений не учла это заранее. В настоящее время идет работа по совер-

шенствованию симулятора принятия решений о перестроениях. Вместе с тем исследуются перспективы развития симулятора для моделирования других аспектов движения:

- более точное моделирование кинематики и динамики автомобиля, моделирование и отработка различных траекторий перестроения. Возможно, точное моделирование траекторий будет задействовано и для окружающих автомобилей;
- Изучается возможность построения виртуального графического изображения окружающей обстановки, с целью включения в симулятор используемой на АвтоНиве подсистемы технического зрения, для тестирования и отработки функционирования всего бортового программного обеспечения в комплексе.

6. Заключение

В данной работе приведен обзор алгоритмов для принятия решений по смене полосы движения. Разработан симулятор для микромоделирования потока автомобилей. Описаны первые испытания симулятора на алгоритме принятия решений для «АвтоНивы». На базе анализа полученных результатов моделирования можно не только отрабатывать алгоритмы перестроения, но и исследовать влияние поведения представленного алгоритма на поток автомобилей. Для дальнейшего развития исследований планируется ввести различные усовершенствования в представленный симулятор. В частности, в модель дороги будут добавлены сужения и расширения, а также ремонтные работы, что приведет к необходимости дополнительных перестроений. Также для повышения реалистичности модели планируется увеличить разнообразие параметров, определяющих поведение автомобилей — а именно, помимо желаемой скорости, учесть различное максимально возможное ускорение, различную величину «просвета», который требуется для перестроения, и различное расстояние, на которое водитель готов приближаться к соседней машине. Такие параметры можно назвать «характером водителя». Кроме того, предполагается сделать эти параметры изменяющимися в процессе движения, а также в зависимости от дорожной ситуации. Например, длина участков для перестроения автомобилей может меняться в зависимости от скорости и ускорения автомобиля. Стоит учесть, что ДТП в принятой концепции симулятора невозможны, однако при реалистичной настройке характеров водителей, вероятно, появится вероятность их моделируемого возникновения, что и будет учтено в последующих работах.

Список литературы

1. *P.-G. Gipps* A model for the structure of lane-changing decisions, *Transp. Res. B, Methodol.*, 1986. vol. 20, no. 5, pp. 403-414.
2. *Q. Yang and H. N. Koutsopoulos* Amicroscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems, *Transp. Res. C, Emerg. Technol.*, 1996. vol. 4, no. 3, pp. 113-129.
3. *A. Kesting, M. Treiber, and D. Helbing* General lane-changing model MOBIL for car-following models, *Transp. Res. Rec.*, vol. 1999, no. 1, pp. 86-94.
4. *J. Hillenbrand, A. M. Spieker, and K. Kroschel* A multilevel collision mitigation approach—Its situation assessment, decision making, and performance tradeoffs, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2006. vol. 7, no. 4, pp. 528–540.
5. *O. C. Puan, M. N. Ibrahim and R. Zakaria*, Multiple logistic regression model of signalling practices of drivers on urban highways, *Proc. AIP Conf.*, pp. 135-136, May 2015.
6. *R. Schubert, K. Schulze, and G. Wanielik* Situation assessment for automatic lane-change maneuvers,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2010. vol. 11, no. 3, pp. 607–616.
7. *R. Schubert and G. Wanielik* Empirical evaluation of a unified Bayesian object and situation assessment approach for lane change assistance, in *Proc. 14th IEEE ITSC*, Oct. 2011, pp. 1471–1476.
8. *R. Schubert* Evaluating the utility of driving: Toward automated decision making under uncertainty, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2012. vol. 13, no. 1, pp. 354–364.
9. *D. Kasper, G. Weidl, T. Dang, G. Breuel, A. Tamke and W. Rosenstiel*, Object-oriented Bayesian networks for detection of lane change maneuvers, *Proc. IEEE Intell. Vehicles Symp.*, pp. 673-678, Jun. 2011.
10. *J. Q. Wang, R. Chai and N. Cao*, Modeling highway lane changing using Bayesian networks, *Appl. Mech. Mater.*, vol. 505, pp. 1143-1147, Jan. 2014.
11. *C. Ma, W. Hao, W. Xiang and W. Yan*, The impact of aggressive driving behavior on driver-injury severity at highway-rail grade crossings accidents, *J. Adv. Transp.*, vol. 2018, no. 58, Oct. 2018.

12. *K. Li, X. Wang, Y. Xu and J. Wang*, Lane changing intention recognition based on speech recognition models, *Transp. Res. C Emerg. Technol.*, vol. 69, pp. 497-514, Aug. 2016.
13. *L. Yun, Z. Hou and D. Yu*, Driving intentions identification based on continuous P-2D HMM, *Proc. 2nd Int. Conf. Digit. Manuf. Automat.*, pp. 460-464, Aug. 2011.
14. *M. Jingjing and W. Yihu*, Driving intentions identification based on continuous pseudo 2D hidden Markov model, *Proc. 5th Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Automat.*, pp. 629-632, Jan. 2012.
15. *Y. Zheng and J. H. L. Hansen*, Lane-change detection from steering signal using spectral segmentation and learning-based classification, *IEEE Trans. Intell. Vehicles*, vol. 2, no. 1, pp. 14-24, Mar. 2017.
16. *R. S. Tomar and S. Verma*, Trajectory predictions of lane changing vehicles using SVM, *Int. J. Vehicle Saf.*, vol. 5, no. 4, pp. 345, Jan. 2011.
17. NGSIM Homepage. FHWA.<http://ngsim.fhwa.dot.gov>)
<https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysisistools/ngsim.htm>
18. *P. Kumar, M. Perrollaz, S. Lefèvre and C. Laugier*, Learning-based approach for online lane change intention prediction, *Proc. IEEE Intell. Vehicles Symp.*, pp. 797-802, Jun. 2013.
19. *Y. Hou, P. Edara and C. Sun*, Situation assessment and decision making for lane change assistance using ensemble learning methods, *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 8, pp. 3875-3882, May 2015.
20. *X.-P. Qiu, Y.-L. Liu, and L.-N. Ma*, A lane change model based on Bayesian networks, *J. Transp. Syst. Eng. Inf. Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 67-73, Aug. 2015.
21. *X. Zhang, J. Sun, X. Qi, and J. Sun*, Simultaneous modeling of car- following and lane-changing behaviors using deep learning, *Transp. Res. C, Emerg. Technol.*, vol. 104, pp. 287-304, Jul. 2019.
22. *C. Lee, P. Yong-Jin and M. Abdel-Ary*, Effects of lane-change and car-following-related traffic flow parameters on crash occurrence by lane, the *Transp. Res. Board 88th Annu. Meeting*, Jan. 2009.
23. *E. Balal, R. L. Cheu, T. Gyan-Sarkodie and J. Miramontes*, Analysis of discretionary lane changing parameters on freeways, *Int. J. Transp. Sci. Tech.*, vol. 2014, no. 3, pp. 277-296, Sep. 2014.

24. *C. Ma, W. Hao, A. Wang and H. Zhao*, Developing a coordinated signal control system for urban ring road under the vehicle-infrastructure connected environment, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52471-52478, 2018.
25. *G. Xie, H. Gao, L. Qian, B. Huang, K. Li and J. Wang*, Vehicle trajectory prediction by integrating physics-and maneuver-based approaches using interactive multiple models, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 7, pp. 5999-6008, Jul. 2018.
26. *L.-H. Xu, S.-G. Hu, Q. Luo, and Y. Zhou*, Lane-changing model based on different types of drivers, *J. South China Univ. Technol. (Natural Sci. Ed.)*, vol. 4, no. 8, pp. 104-111, Aug. 2014.
27. *X.-M. Liu and X.-Y. Wang*, Study of vehicle lane-changing behavior model of cellular automata based on information interaction, *Appl. Res. Comput.*, vol. 27, no. 10, pp. 3826-3828, Oct. 2010.
28. *A. Podoprosvetov, K. Kiy, V. Pavlovsky and D. Anokhin*, Development of Complex Control System for the Autonomous Vehicle Niva, 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, 2019, pp. 311-315, doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976523.
29. *Kiy, K.I., Anokhin, D.A. Podoprosvetov, A.V.* A Software System for Processing Images with Parallel Computing. *Program Comput Soft* 46, 406–417 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0361768820060043>
30. *J. Gao, Y. L. Murphey and H. Zhu*, Multivariate time series prediction of lane changing behavior using deep neural network, *Appl. Intell.*, vol. 48, no. 10, pp. 3523-3537, Oct. 2018.
31. *G. Xu, L. Liu, Y. Ou and Z. Song*, Dynamic modeling of Driver control strategy of lane-change behavior and trajectory planning for collision prediction, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 1138-1155, Sep. 2012.
32. *B. Morris, A. Doshi and M. Trivedi*, Lane change intent prediction for driver assistance: On-road design and evaluation, *Proc. IEEE Intell. Vehicles Symp.*, pp. 895-901, Jun. 2011.
33. *A. Talebpour, H.-S. Mahmassani, and S. H. Hamdar*, Modeling lane- changing behavior in a connected environment: A game theory approach, *Transp. Res. C, Emerg. Technol.*, vol. 59, pp. 216-232, Oct. 2015.

34. *Kiy K.I.* A new method of global image analysis and its application in understanding road scenes // Pattern Recognit. Image Anal., 2018. N 3(28). -с. 483–494.
35. *Kiy K.I.* An image understanding system based on the geometrized histograms method: finding the sky in road scenes // CEUR Workshop Proceedings. V. 2210. P. 291-299. <http://ceur-ws.org/Vol-2210/paper38.pdf/>.
36. *Павловский В.Е., Павловский В.В* Математические модели стайных аспектов в описании транспортных ситуаций // Известия Волгоградского государственного технического университета, № 3(226), Г. 2019 С. 37-41.