

Метод Построения Модели Пространства Автономных Транспортных Средств

Ю.А. Ляховенко, С. Мухамеджанов, И.И. Комаров

Аннотация—Модель пространства описывает совокупность абстракций, предназначенных для представления всех значимых физических и виртуальных элементов в пространстве. Использование моделей объектов особенно важно в условиях, когда автономные транспортные средства (АТС) сталкиваются с непредвиденными обстоятельствами или техническими сбоями. В предлагаемом методе построения модели пространства, АТС в начале собирает всю информацию об объектах внешней среды, после чего проводит кластерный анализ для приведения их к определенным типам. После чего определяет возможные состояния и сценарии поведения для каждого из определенных типов. В процессе дальнейшего исследования АТС с помощью систем технического зрения обнаруживает объект и по определенным характеристикам относит его к ближайшему типу с определенным порогом (расстоянием от кластера). Если подобная операция невозможна - создается новый тип.

Представленный метод построения модели пространства определяет автоматизированный сбор и описание информации о внешней среде, что позволяет повысить эффективность работы автономных транспортных средств за счет возможности непрерывной актуализации модели пространства. В дальнейшем планируется доработка модели в части определения степени доверия к полученной новой информации.

Ключевые слова—моделирование, автономные транспортные средства, моделирование пространства, сценарии поведения объектов, определение типов объектов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Модель объектов описывает совокупность абстракций, предназначенных для представления всех значимых физических и виртуальных элементов в пространстве. Использование моделей объектов особенно важно в условиях, когда АТС сталкиваются с

Статья получена 22 апреля 2024.

Ляховенко Юлия Александровна, аспирант факультета Безопасности Информационных Технологий, Национальный исследовательский университет ИТМО (email: lyakhovenko.kam@gmail.com).

Мухамеджанов Санжар, аспирант факультета Безопасности Информационных Технологий, Национальный исследовательский университет ИТМО (email: sannhyk@mail.ru).

Комаров Игорь Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник факультета Безопасности Информационных Технологий, Национальный исследовательский университет ИТМО (e-mail: iik_st@mail.ru).

непредвиденными обстоятельствами или техническими сбоями. Анализируя отклонения в полученных данных от ожидаемых значений, основанных на модели, система может определить аномалии: неисправность оборудования или попытки внешнего вмешательства. Такой подход позволяет реагировать на возможные угрозы, внося коррективы в работу систем или предпринимая действия по их устранению.

По данным аналитиков исследовательской компании Gartner [1], по состоянию на конец 2023 года, более 750000 единиц с различной степенью автономности были зарегистрированы во всем мире. Это число продемонстрировало впечатляющий рост по сравнению с предыдущим годом, увеличившись на 30%, что подчеркивает ускоренное принятие и адаптацию АТС в обществе. Особое внимание уделяется их потенциалу существенно снизить количество дорожно-транспортных происшествий, связанных с человеческим фактором. Согласно статистике ГИБДД за 2022 год [2], в России произошло 132,4 тысячи ДТП, в результате которых погибло 14,5 тысяч человек и было ранено 166,5 тысячи человек. Эти данные ярко демонстрируют высокую степень риска, связанную с управлением транспортными средствами вручную. Исходя из статистических данных, интеграция АТС в инфраструктуру дорожного движения определяют ключевые параметры трафика и модели поведения других участников дорожного движения.

Одним из главных преимуществ моделей объектов является их способность быстро адаптироваться к изменениям в окружающей среде. Модели объектов, обновляемые в реальном времени, могут позволить АТС своевременно получать информацию об этих изменениях и адаптировать свои маршруты и поведение для минимизации задержек и поддержания безопасности.

Использование общих моделей объектов позволит улучшить координацию и взаимодействие между различными АТС и элементами инфраструктуры. Это включает в себя не только другие транспортные средства, но и дорожные знаки, светофоры, зарядные станции и другие элементы городской инфраструктуры. Благодаря обмену информацией на основе единой модели, АТС могут более эффективно синхронизировать свои действия, оптимизируя скорость и маршруты в соответствии с текущей дорожной ситуацией, что способствует уменьшению заторов и повышению общей безопасности на дорогах.

Модули обнаружения, основанные исключительно на данных от сенсоров, могут быть неэффективны в определенных условиях (изменение метеорологической оптической видимости). На этом этапе функционирования АТС появляются сложные или

непредвиденные сценарии - временные изменения в дорожных условиях, непредсказуемое поведение участников дорожного движения или технические неполадки, благодаря которым возникает неполнота данных. Внедрение моделей объектов, описывающих не только физические характеристики объектов, но и их поведенческие сценарии, позволяет АТС лучше адаптироваться к сложным условиям, прогнозируя потенциальные изменения и угрозы, что является важным аспектом повышения безопасности.

Традиционно, карта рассматривается как статическое представление пространства, что может быть недостаточным для работы АТС, требующих динамичного и многоаспектного восприятия окружающей среды. Предлагаемая модель пространства, основанная на системе описания объектов, их сценариев поведения и состояний, представляет собой значительное расширение этой концепции. Такой подход позволяет АТС не просто обнаруживать объекты, но и понимать их возможное поведение и взаимодействие с ними. Это означает, что АТС может проверять достоверность данных с сенсоров, опираясь на атрибуты модели, прогнозировать действия других участников дорожного движения и адекватно реагировать на них.

II. ПРОБЛЕМА ПОСТРОЕНИЯ И АКТУАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ

В статье [3] авторы обсуждают подход к улучшению позиционирования АТС с использованием комбинации GPS, сенсоров и внутренних датчиков, дополненный кинематическими и динамическими моделями транспортного средства. Этот метод решает ограничения GPS в условиях, таких как городские каньоны или крытые парковки, используя улучшения локальной точности и стабильности от визуального SLAM (одновременной локализации и построения карты) и слияния данных с датчиков.

Оптимизационный метод предсказательного управления [4] имеет ключевое значение для планирования и принятия решений на перекрестках - сценарии имеют некоторую степень сложности из-за необходимости реагирования в реальном времени на динамические препятствия. Этот подход использует различные модели транспортных средств (точечная масса, кинематическая, динамическая) и стратегии избегания препятствий, подчеркивая необходимость точного моделирования и оптимизации для безопасного проезда перекрестков. Авторы делают акцент на разработке алгоритмов, которые могут предсказывать и реагировать на потенциальные опасности, оптимизируя путь транспортного средства для безопасности и эффективности.

Оптимальная модель управления для локального планирования пути [5], которая интегрирует динамические ограничения транспортного средства и условия окружающей среды в набор ограничений задачи оптимизации. Используя гауссовский псевдоспектральный метод, авторы формулируют задачу оптимального управления как проблему нелинейного программирования, направленную на оптимизацию планирования траектории для смены полосы движения и избегания препятствий на городских дорогах. Этот

метод выделяется своей способностью адаптироваться к сложным городским сценариям вождения, гарантируя, что АТС могут безопасно маневрировать вокруг препятствий, сохраняя при этом оптимальный маршрут.

Также проблема при разработке таких моделей является картографирование неизвестных сред. Авторы [6] предлагают методы, основанные на алгоритмах Локально-Глобальной Стратегии (LAGS), для решения этих проблем путем объединения стратегий локального исследования с глобальными стратегиями восприятия. Этот подход дополняется регрессией гауссовских процессов (GPR), выборкой оптимизации Байеса (BO) и глубокое обучение с подкреплением (DRL), который направлен на улучшение эффективности исследования.

В области алгоритмов эвристического исследования к классическим можно отнести граничные и информационные. Авторы [7] впервые предложили метод границ, используя алгоритм поиска глубины для направления робота к ближайшей точке границы, тем самым облегчая исследование карты. Этот метод открыл различные улучшения, например, интеграция алгоритма быстро исследуемого случайного дерева (RRT) для определения потенциальных точек границ [8] и разработка эффективной глобальной функции оптимизации для выбора лучшей точки границы [9]. Однако безопасность местоположений, определенных методом границ, остается неопределенной. Чтобы решить эту проблему, авторы [10] объединили планирование исследования границ (FEP) с планированием следующего лучшего обзора (NBVP), позволяя безопасно исследовать большие неизвестные области.

III. МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВА АТС

Пусть модель пространства (множество наблюдений) есть M_t , где t - некоторый момент времени. При этом:

$$M_t = \{m_1^t, m_2^t, \dots, m_n^t\}, \quad (1)$$

где m_i^t - модель i объекта (наблюдения) в момент времени t .

Определение 1: Характеристика (объекта) - информация об объекте, формализованная в вид, подходящий для аналитической обработки.

Определение 2: Состояние объекта - некоторый возможный набор значений характеристик объекта.

Определение 3: Сценарий поведения - процесс функционирования объекта в некотором временном диапазоне, относящийся к определенной контекстной категории.

Модель пространства снабжается информацией из следующих источников:

- сенсорная информация собирается некоторым сенсорным блоком автономного транспортного средства - a_j^{phy} ;
- информация, поступившая при информационном взаимодействии с другими АТС Ar_j ;
- информация, поступившая от стационарных систем (CC) Str_j .

Для построения модели пространства АТС в момент времени t_0 происходит сбор информации о характеристиках обнаруженных физическим блоком объектов АТС.

$$Ch_{a_j, M}(t_0) = \bigcup_{i=1}^N Detect(m_i, t_0). \quad (2)$$

После этого в момент времени $t_0 + 1$ АТС a_j производит информационный обмен с АТС и СС в радиусе r и объединяет полученные множества характеристик объектов в момент времени t_0 .

$$\begin{aligned} Ch_{a_j, M}(t_0 + 1) &= Ch_{a_j, M}(t_0) \cup \cup \\ Ch_{Ar(a_j), M}(t_0) &\cup Ch_{Str(a_j), M}(t_0) \end{aligned} \quad (3)$$

где $Ch_{Ar(a_j), M}(t_0)$ - множество характеристик объектов, определенных группой АТС в момент времени t_0 , находящихся в радиусе r от агента a_j и производящих с ним информационное взаимодействие; $Ch_{Str(a_j), M}(t_0)$ - множество характеристик объектов, определенных стационарными системами в момент времени t_0 , находящихся в радиусе r от агента a_j и производящих с ним информационное взаимодействие.

Определение типов объектов

Для выделения обнаруженных объектов в некоторые группы (типы объектов) требуется провести кластерный анализ полученных характеристик. Пусть существует n типов (кластеров) объектов в виде некоторого множества Y . Тогда существует некоторая функция $f: M \rightarrow Y$, которая для каждого объекта $m_i \in M$ ставит в соответствие идентификатор кластера (тип объекта) $y_k \in Y$.

Определение состояний объектов

Как было сказано выше, состоянием объекта является некоторая возможная комбинация значений характеристик. Для каждого типа объектов $y_k \in Y$ определим множество состояний $S_{y_k} = \{s_{y_k, 1}, \dots, s_{y_k, q}\}$. Для этого необходимо провести анализ всех полученных характеристик для всех объектов $M(y_k)$, относящихся к типу y_k .

$$\forall y_k \in Y: S_{y_k} = fun(\bigcup_{m_i \in M(y_k)} Ch_{m_i}). \quad (4)$$

Определение сценариев поведения объектов

Определим множество возможных сценариев поведения Sc_{y_k} объекта m_i типа y_k как его переход из одного состояния $s_{y_k, s}^t$ в момент времени t в другое состояние $s_{y_k, d}^{t+1}$ в момент времени $t + 1$:

$$Sc_{y_k} = fun: s_{y_k, s}^t \rightarrow s_{y_k, d}^{t+1}. \quad (5)$$

Так как сценарии поведения типов объектов является некоторой функцией перехода из одного состояния в

другое, их можно объединить в последовательный граф - граф сценариев поведения.

Каждый тип объектов $y_k \in Y$ характеризуется следующим набором атрибутов:

- множество возможных характеристик объекта типа y_k - Ch_{y_k} ;
- граф сценариев поведения объектов, относящихся к типу y_k , $GraphSc_{y_k}$;
- множество возможных комбинаций характеристик объектов, т.е. множество состояния объектов, относящихся к типу y_k , S_{y_k} .

Модель объекта момент времени t определяется следующим образом:

$$m_i^t = \{Ch_{detected, m_i}(t), Sc_{detected, m_i}(t)\}, \quad (6)$$

где $Ch_{detected, m_i}(t)$ - обнаруженные физическим блоком автономного транспортного средства характеристики объекта m_i в момент времени t , $Sc_{detected, m_i}(t)$ - определенные физическим блоком автономного транспортного средства изменения характеристик объекта m_i во временной промежуток $(t - 1, t)$.

На основе полученных характеристик $Ch_{detected, m_i}(t)$ объекта m_i он относится к ближайшему типу y_k с определенным порогом k . После чего возможен анализ полученного физическим блоком автономного транспортного средства множества изменения характеристик $Sc_{detected, m_i}(t)$ с определенным ранее множеством возможных сценариев поведения Sc_{y_k} .

Если функция отнесения объекта невозможна из-за превышения порога k - создается новый тип объектов: $Y_t = Y_{t-1} \cup y_k$. Этому типу определяются соответствующие состояния S_{y_k} и сценарии поведения Sc_{y_k} .

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод построения модели пространства автономных транспортных средств, который позволяет систематизировать и классифицировать различные объекты, участвующие в автономном движении, и определить их поведенческие характеристики в зависимости от контекста. Анализ детектируемых объектов и выделение их типов, состояний и сценариев способствует более глубокому пониманию динамики поведения объектов и прогнозированию возможных ситуаций во внешней среде.

В дальнейшем планируется провести имитационное моделирование разработанного метода для систем автономного железнодорожного транспорта, а также определить методы актуализации модели и обеспечения достоверности получаемых данных.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1]Статья: Беспилотные автомобили (мировой рынок). Gartner - статистика по БТС. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>
- [2]Показатели состояния безопасности дорожного движения. Госавтоинспекция. [Электронный ресурс]. – URL: <http://stat.gibdd.ru/>
- [3]Min H. et al. Kinematic and dynamic vehicle model-assisted global positioning method for autonomous vehicles with low-cost GPS/camera/in-vehicle sensors //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 24. – С. 5430.
- [4]Li S. et al. Planning and decision-making for connected autonomous vehicles at road intersections: A review //Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2021. – Т. 34. – С. 1-18.
- [5]Li Z. et al. Obstacle Avoidance Trajectory Planning for Autonomous Vehicles on Urban Roads Based on Gaussian Pseudo-Spectral Method //World Electric Vehicle Journal. – 2023. – Т. 15. – №. 1. – С. 7.
- [6]Feng A. et al. Efficient Autonomous Exploration and Mapping in Unknown Environments //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 10. – С. 4766.
- [7]Yamauchi B. A frontier-based approach for autonomous exploration //Proceedings 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation CIRA'97.'Towards New Computational Principles for Robotics and Automation'. – IEEE, 1997. – С. 146-151.
- [8]Wu C. Y., Lin H. Y. Autonomous mobile robot exploration in unknown indoor environments based on rapidly-exploring random tree //2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – IEEE, 2019. – С. 1345-1350.
- [9]Dang T. et al. Explore locally, plan globally: A path planning framework for autonomous robotic exploration in subterranean environments //2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). – IEEE, 2019. – С. 9-16.
- [10] Selin M. et al. Efficient autonomous exploration planning of large-scale 3-d environments //IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Т. 4. – №. 2. – С. 1699-1706.

Method for Building an Environment Model of Autonomous Vehicles

J.A. Lyakhovenko, S. Mukhamedzhanov, I.I. Komarov

Abstract—An environment model describes a set of abstractions designed to represent all significant physical and virtual elements in space. The use of asset models is especially important when autonomous vehicles (AVs) encounter unforeseen circumstances or technical failures. In the proposed method for constructing a model of environment, the AV first collects all information about objects in the external environment, after which it conducts cluster analysis to reduce them to certain types. Then it determines possible states and behavior scenarios for each of the defined types. In the process of further research, the vehicle uses technical vision systems to detect an object and, based on certain characteristics, classify it as the closest type with a certain threshold (distance from the cluster). If such an operation is impossible, a new type is created.

The presented method for constructing a space model determines the automated collection and description of information about the external environment, which makes it possible to increase the efficiency of autonomous vehicles due to the possibility of continuous updating of the space model. In the future, it is planned to refine the model in terms of determining the degree of confidence in the new information received.

Keywords— modeling, autonomous vehicles, environment modeling, object behavior scenarios, definition of object types.

REFERENCES

- [1] Article: Self-driving cars (world market). Gartner - statistics on BTS. [Electronic resource]. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>
- [2] Road safety indicators. State traffic inspectorate. [Electronic resource]. – URL: <http://stat.gibdd.ru/>
- [3] Min H. et al. Kinematic and dynamic vehicle model-assisted global positioning method for autonomous vehicles with low-cost GPS/camera/in-vehicle sensors //Sensors. – 2019. – T. 19. – №. 24. – C. 5430.
- [4] Li S. et al. Planning and decision-making for connected autonomous vehicles at road intersections: A review //Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2021. – T. 34. – C. 1-18.
- [5] Li Z. et al. Obstacle Avoidance Trajectory Planning for Autonomous Vehicles on Urban Roads Based on Gaussian Pseudo-Spectral Method //World Electric Vehicle Journal. – 2023. – T. 15. – №. 1. – C. 7.
- [6] Feng A. et al. Efficient Autonomous Exploration and Mapping in Unknown Environments //Sensors. – 2023. – T. 23. – №. 10. – C. 4766.
- [7] Yamauchi B. A frontier-based approach for autonomous exploration //Proceedings 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation CIRA'97, 'Towards New Computational Principles for Robotics and Automation'. – IEEE, 1997. – C. 146-151.
- [8] Wu C. Y., Lin H. Y. Autonomous mobile robot exploration in unknown indoor environments based on rapidly-exploring random tree //2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – IEEE, 2019. – C. 1345-1350.
- [9] Dang T. et al. Explore locally, plan globally: A path planning framework for autonomous robotic exploration in subterranean environments //2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). – IEEE, 2019. – C. 9-16.
- [10] Selin M. et al. Efficient autonomous exploration planning of large-scale 3-d environments //IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – T. 4. – №. 2. – C. 1699-1706.