

УДК 004.032.26

Разработка интеллектуальной системы навигации для предотвращения столкновений с пешеходами

Фаталиев Джавид Сефибекович

fatalievvd@mail.ru

Панилов Павел Алексеевич^(*)

panilovp.a@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе предложена интеллектуальная система навигации средств индивидуальной мобильности (СИМ) на основе прогнозирования траекторий с помощью нейронных сетей LSTM и маршрутизации с использованием алгоритма A*. Метод обеспечивает прогнозирование зон риска и построение безопасных маршрутов, применимых в задачах умного города.

Ключевые слова: интеллектуальная система навигации, средства мобильности, прогнозирование траекторий, алгоритм A*, нейронные сети LSTM, зоны безопасности, предотвращение столкновений

Development of an intelligent navigation system to prevent collisions with pedestrians

Fataliev Dzhavid Sefibekovich

fatalievvd@mail.ru

Panilov Pavel Alekseevich

panilovp.a@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The study proposes an intelligent navigation system for personal mobility vehicles (PMVs) based on trajectory prediction using LSTM neural networks and routing via the A* algorithm. The method supports risk zone prediction and safe route planning, applicable in smart city tasks.

Keywords: intelligent navigation system, mobility aids, trajectory prediction, A* algorithm, LSTM neural networks, safety zones, collision avoidance

Введение. Современные средства индивидуальной мобильности (СИМ), такие как электросамокаты, велосипеды и гироскутеры, становятся неотъемлемой частью городской среды, предоставляя удобный способ передвижения. Однако их массовое использование наряду с интенсивным пешеходным движением увеличивает риск ДТП. Актуальной задачей становится предотвращение столкновений между пользователями СИМ и пешеходами. Для решения этой проблемы предлагается использовать методы машинного обучения и анализа временных рядов. Работа основана на применении LSTM-нейросетей для прогнозирования траекторий участников движения и алгоритма A* для построения оптимального маршрута с учетом зон безопасности, что позволяет адаптировать движения СИМ и минимизировать риск столкновений.

Цель исследования — создать интеллектуальную навигационную систему для предотвращения аварий между СИМ и пешеходами. Для ее достижения выполнены анализ существующих решений, разработка модели на основе LSTM, формирование зон безопасности, реализация алгоритмов маршрутизации и создание интерфейса для визуализации.

Интеграция методов машинного обучения, анализа временных рядов и оптимизационных алгоритмов в предлагаемой системе повышает безопасность городской мобильности и способствует развитию технологий умного города.

Материалы и методы. Для прогнозирования траекторий пешеходов использовался набор данных Stanford Aerial Pedestrian Dataset, отражающий реальные сценарии движения в городской среде. Данные были предварительно обработаны: траектории каждого пешехода разбили на последовательности, нормализовали в масштабе карты и применили методологию «скользящего окна» (8 шагов наблюдений для предсказания 12 шагов).

Для моделирования применялась архитектура LSTM (Long Short-Term Memory), которая успешно зарекомендовала себя в задачах распознавания активности в последовательных данных [1,2]. Модель энкодер-декодер использовала входные данные для формирования скрытого состояния, которое затем применялось для авторегрессионного предсказания следующих точек траектории.

Для выявления «поток» движения применялся кластеризационный подход на основе графов: траектории выступали узлами, а пересечения зон безопасности формировали ребра. Это позволило учитывать взаимодействие пешеходов.

Зоны безопасности создавались вокруг предсказанных траекторий в виде окружностей, объединяющих точки маршрута. Пространство маршрутизации делилось на сетку, и ячейки, попадающие в зоны риска, отмечались как недоступные. Такой подход обеспечивал учет динамики движения при планировании безопасных маршрутов.

Результаты. В ходе выполненной работы удалось разработать интеллектуальную систему навигации для предотвращения столкновений средств индивидуальной мобильности (СИМ) с пешеходами. Достигнутый результат базируется на применении методов прогнозирования траекторий, кластеризации потоков движения и оптимизации маршрутов. Представленные результаты подтверждают эффективность разработанной системы как в задачах анализа движений, так и в построении безопасных маршрутов.

Для прогнозирования динамики движения пешеходов была разработана модель на основе LSTM (Long Short-Term Memory). На стадии обучения модель показала удовлетворительные результаты, продемонстрировав следующие метрики:

Среднеквадратичная ошибка (ADE): 9.95. Эта метрика отражает среднее расстояние между истинными и предсказанными точками траектории.

Ошибка последнего шага (FDE): 18.98. Значение метрики показывает степень расхождения для самой дальней точки предсказания.

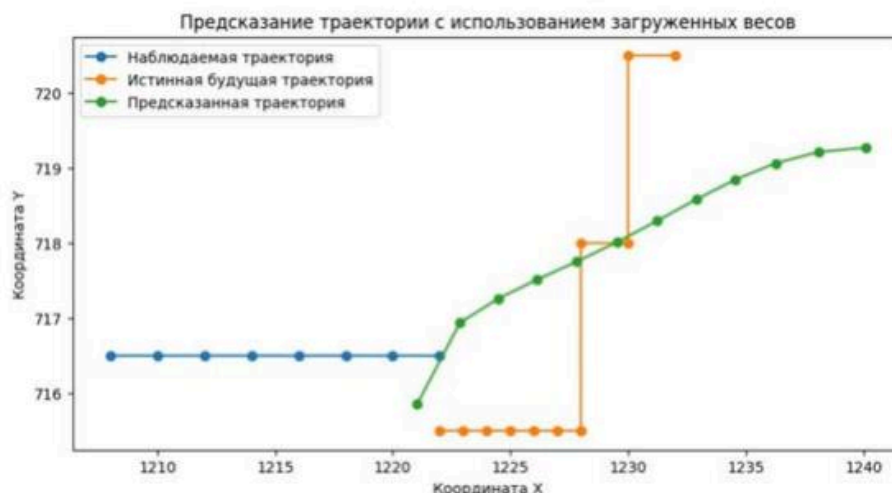


Рис. 1. Предсказание траектории

На рис. 1 представлено визуальное сравнение истинной траектории пешехода и ее предсказания моделью. Анализ продемонстрировал, что рекуррентные механизмы LSTM оправдывают свою использование, позволяя учитывать как краткосрочные, так и долгосрочные зависимости во временных рядах, что критически важно для моделирования траекторий.

После предсказания траекторий была выполнена кластеризация пешеходных потоков. Выделенные потоки использовались для формирования зон безопасности, которые отражают области с повышенной вероятностью пересечения траекторий. Для этого применялось построение bounding boxes и циклокартографов вокруг предсказанных точек.

На рис. 2 показано, как зоны безопасности визуализируются в контексте городской карты. Эти зоны эффективно покрывают области пересечения и взаимодействия пешеходов, что минимизирует вероятность столкновений при прокладке маршрутов.

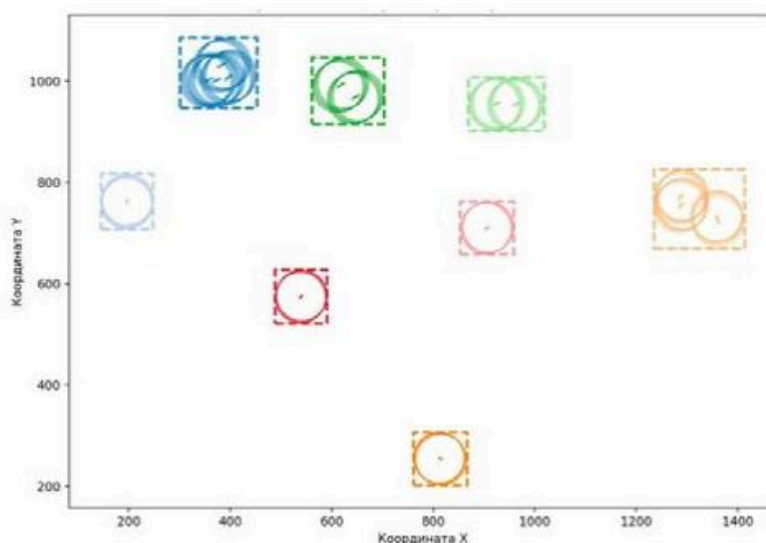


Рис. 2. Зоны безопасности

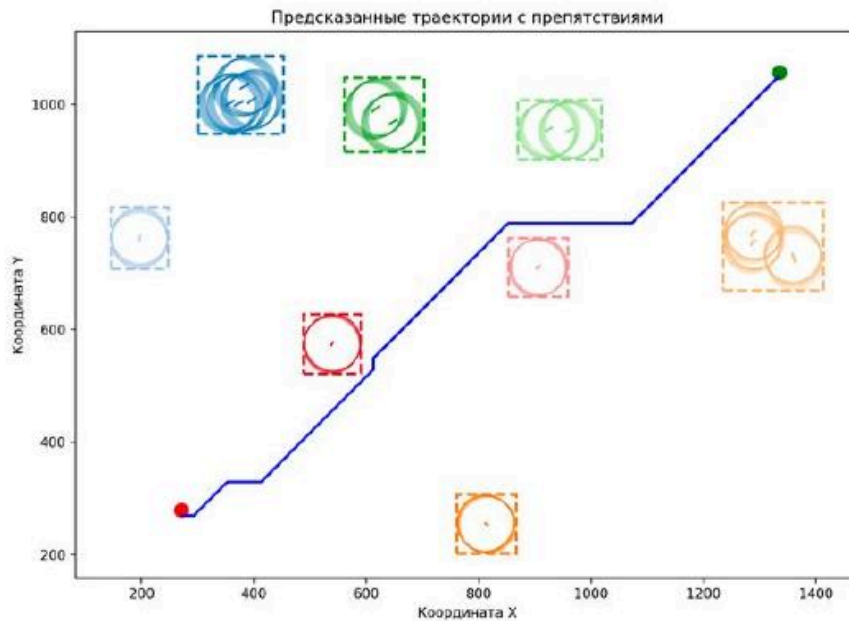


Рис. 3. Траектория движения СИМ с алгоритмом A*

Для построения безопасных маршрутов от точки А до точки В был применен алгоритм A* в сочетании с созданной пространственной сеточной моделью. Пространство маршрутизации разбивалось на сетку, где зоны безопасности исключались из доступных областей. Алгоритм A* продемонстрировал высокую эффективность за счет эвристической функции, использующей евклидово расстояние для нахождения кратчайшего маршрута.

На рис. 3 представлен итоговый маршрут, построенный с помощью алгоритма A*. Маршрут корректно обходит области обозначенных зон безопасности, минимизируя риск столкновений.

Сравнение подходов показало превосходство A* над эволюционными алгоритмами:

Время нахождения маршрута: алгоритм A* выполнял расчеты в 5–10 раз быстрее.

Качество маршрута: маршруты, построенные A*, оказались короче и стабильнее, чем результаты эволюционных алгоритмов, которые часто содержали избыточные сегменты [3, 4].

Обсуждение. Результаты исследования подтвердили гипотезу о том, что комбинация методов машинного обучения и алгоритмов оптимизации может минимизировать риск столкновений между СИМ и пешеходами. Прогнозирование траекторий с использованием LSTM показало удовлетворительную точность ($ADE = 9.95$, $FDE = 18.98$), что достаточно для формирования зон риска.

Кластеризация траекторий в потоки и формирование зон безопасности подтвердили свою эффективность. По сравнению с работой Alahi A. и др. [5], где применялось Social LSTM для учета взаимодействий между пешеходами, предложенная система оказалась более простой в вычислениях, хотя и уступает в точности при высокой плотности движения.

Алгоритм A^* продемонстрировал стабильные результаты в прокладке маршрутов, обходя зоны риска с минимальной длиной пути. Это соответствует результатам других авторов [6], использующих A^* в подобных задачах. Сравнение с эволюционными алгоритмами показало более высокую скорость и точность A^* .

Ограничения включают использование данных из ограниченного набора сценариев, отсутствие учета сложных взаимодействий между движущимися объектами и зависимость от разрешения сетки в маршрутизации. В будущем можно улучшить прогноз и гибкость маршрутов, интегрировав более сложные модели взаимодействий, такие как Social LSTM, и расширив обучающие наборы данных.

Полученные результаты подтверждают, что разработанная система может применяться для повышения безопасности в условиях городской мобильности.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило достижимость поставленной цели — разработки интеллектуальной системы навигации, предотвращающей столкновения средств индивидуальной мобильности с пешеходами. Разработанная система успешно сочетает прогнозирование траекторий, формирование зон безопасности и построение безопасных маршрутов, демонстрируя ее потенциальную практическую и научную ценность.

Достигнутые результаты соответствуют ожидаемым: применение LSTM для анализа временных рядов позволило успешно решать задачу прогнозирования траекторий, а алгоритм маршрутизации A^* гарантировал надежное построение оптимальных маршрутов с обходом зон риска. Однако эффекты, связанные с плотными взаимодействиями пешеходов или сложными дорожными ситуациями, требуют дополнительных исследований и внедрения более сложных моделей.

Практическая применимость системы включает интеграцию в навигационные приложения для электросамокатов, велосипедов и прочих видов индивидуального транспорта. Она может быть использована в умных городах для повышения безопасности на дорогах и снижения риска ДТП. В научной среде подходы, примененные в работе, могут стать основой для разработки более сложных систем, учитывающих не только прогноз, но и реакцию участников движения в реальном времени.

Таким образом, полученные результаты подтверждают актуальность работы и ее значимость для решения современных задач городской мобильности. Разработанная система открывает перспективы для последующей доработки и внедрения в масштабные инфраструктурные проекты.

Список источников

- [1] Wu Y., Jha D.K., De Meneses S.B., Chen L., Wu J., Palaniappan K., El-Khamy M., Davis L., Abuelhaija A. Holistic LSTM for Human Activity Recognition Using Wearable Sensors. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, vol. 30, pp. 3332–3345.
<https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3058848>

- [2] Schmidt R.M. Recurrent Neural Networks (RNNs): A Gentle Introduction and Overview. Arxiv preprint, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.05911>
- [3] Загинайло М.В., Фатхи В.А. Генетический алгоритм как эффективный инструмент эволюционных алгоритмов. *Инновации. Наука. Образование*, 2020, № 22, с. 513–518.
- [4] Панилов П.А., Кокорев А.В. Эволюционные алгоритмы оптимизации управления безопасностью критической инфраструктуры на основе когнитивных карт. *Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов. Междунар. науч.-практ. конф.: сб. тр.* Москва, Академия управления МВД РФ, 2024, с. 232–238. EDN: BPCWNO
- [5] Alahi A., Goel K., Ramanathan V., Robicquet A., Fei-Fei L., Savarese S. Social LSTM: Human Trajectory Prediction in Crowded Spaces. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 961–971. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.110>
- [6] Wang F., Sun W., Yan P., Wei H., Lu H. Research on Path Planning for Robots with Improved A* Algorithm under Bidirectional JPS Strategy. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 5622, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/app14135622>