

УДК (UDC) 621.373.9

**КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, МЕТОДИКА И ПРОВЕДЕНИЕ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
РОБОТА-НАВИГАТОРА НА МЕКАНУМ КОЛЕСАХ****KINEMATIC ANALYSIS, METHODS AND EXPERIMENTAL STUDIES
OF ROBOT NAVIGATOR MOVEMENTS ON MECANUM WHEELS**Сладкова Л. А., Пшибиев А.М.
Sladkova L.A., Pshibiev A.M.Российский университет транспорта (Москва, Россия)
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Машинное обучение и искусственный интеллект, способные сами принимать решения, стали незаменимыми инструментами для оптимизации складских операций. Использование на складах грузоподъемного оборудования на мобильной платформе на механум колесах имеет высокую степень практической реализации, так как рассматриваемая платформа может совершать движения в любом направлении. Кинематические исследования перемещения робота-манипулятора на рассматриваемой платформе позволяют оптимизировать его движения в условиях перемещения в ограниченном пространстве, имеющем подвижные и неподвижные препятствия, которые с позиции создания математической модели управления платформой представляют собой входные параметры, определяющие условия работы платформы. Методика проведения экспериментальных исследований и их анализ позволяют оптимизировать управление и поведение платформы на практике. Алгоритм перемещения платформы разработан с учетом ее особенностей предназначен для выбора оптимального маршрута и точности навигации при условиях изменяемого пространства (подвижные и неподвижные объекты). Для верификации и оценки эффективности алгоритма локализации и планирования пути с целью улучшения системы управления мобильной платформой на механум колесах, были проведены моделирование и симуляция представленной модели, позволяющие оценить кинематические параметры платформы для достижения лучших результатов. Проведенный кинематический анализ позволил провести качественную и количественную оценку особенностей движения поведения платформы в пространстве при различных входных данных. Моделирование и симуляция алгоритма локализации и планирования пути позволили проверить его эффективность в различных условиях работы. Проведенные исследования показали, что предлагаемый метод кинематического анализа навигационной системы складского робота на механум колесах позволяет оптимизировать его работу в складских условиях, что позволит повысить эффективность перемещения грузов и обеспечить

Abstract. Machine learning and artificial intelligence, capable of making decisions on their own, have become indispensable tools for optimizing warehouse operations. The use of lifting equipment on a mobile platform on mechanical wheels in warehouses has a high degree of practical implementation, since the platform in question can move in any direction without U-turns. Kinematic studies of the movement of the robotic arm on the platform under consideration make it possible to optimize its movement and behavior in conditions of movement in a confined space with movable and fixed obstacles, which, from the standpoint of creating a mathematical model of platform control, are input parameters that determine the operating conditions of the platform. The methodology for conducting experimental studies and their analysis allow you to optimize the management and behavior of the platform in practice. The platform movement algorithm is developed taking into account its features and is designed to select the optimal route and navigation accuracy under changing space conditions (moving and stationary objects). In order to verify and evaluate the effectiveness of the localization and path planning algorithm in order to improve the control system of the mobile platform on mecanum wheels, modeling and simulation of the presented model were carried out, which made it possible to assess the kinematic parameters of the platform to achieve better results. The kinematic analysis made it possible to carry out a qualitative and quantitative assessment of the features of the movement of the platform behavior in space with various input data. Modeling and simulation of the path localization and planning algorithm made it possible to test its effectiveness in various operating conditions. The studies carried out have shown that the proposed method of kinematic analysis of the navigation system of a warehouse robot on mecanum wheels allows you to optimize its operation in warehouse conditions, which will increase the efficiency of cargo movement and ensure accurate navigation in the limited space of the warehouse. The development of kinematic and dynamic analysis of the navigation system of a warehouse robot on mecanum wheels opens up prospects for the creation of intelligent and autonomous solutions in the field of logistics and warehousing.

точную навигацию в ограниченном пространстве склада. Развитие кинематического и динамического анализа навигационной системы складского робота на меканум колесах открывает перспективы для создания интеллектуальных и автономных решений в области логистики и складского хозяйства.

Ключевые слова: меканум колеса, кинематический анализ, моделирование, робототехнические платформы грузоподъемных средств.

Дата получения статьи: 25.05.2024
Дата принятия к публикации: 19.09.2024
Дата публикации: 25.09.2024

Сведения об авторах:

Сладкова Любовь Александровна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта;
e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.

ORCID: 0009-0008-6786-0386

Пшибиев Артур Мартинович – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта,
e-mail: pancheeez@ya.ru

ORCID: 0009-0005-7898-5449

Keywords: wheel mecanum, kinematic analysis, modeling, robotic platforms of lifting equipment.

Date of manuscript reception: 25.05.2024
Date of acceptance for publication: 19.09.2024
Date of publication: 25.09.2024

Authors' information:

Liubov A. Sladkova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Land Transport and Technological Means, Russian University of Transport; *e-mail:* rich.cat2012@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-5409-6250

Artur M. Pshibiev – Postgraduate student, Department of Land Transport and Technological Means, Russian University of Transport, *e-mail:* pancheeez@ya.ru

ORCID: 0009-0005-7898-5449

1. Введение

Складское хозяйство является сложной логистической структурой в состав технологического оборудования которых входят оборудование для хранения товаров (изделий), подъемно-транспортное оборудование, весоизмерительное и фасовочное оборудование. В соответствии с классификационными признаками к числу подъемно-транспортного оборудования относят погрузочно-разгрузочные машины (вилочные погрузчики, штабелеры и рохли), предназначенные для выполнения прямого назначения, перемещения и складирования грузов внутри склада в условиях ограниченного пространства [1]. К их числу, как правило относят электропогрузчики и автопогрузчики.

В настоящее время, машинное обучение и искусственный интеллект, способные сами принимать решения, стали незаменимыми инструментами для оптимизации складских операций. Исходя из сказанного, для решения задач логистики необходимо помимо автоматизации процессов складских работ внедрение роботов [2-6].

Очевидно, что применение роботов в складском хозяйстве позволит усовершенствовать логистические процессы другими словами повысить производительность, улучшить условия труда.

Сервисная робототехника стала практически неотъемлемой частью нашей жизни, она используется на многих организациях и предприятиях в мире, и её потребность возрастает с каждым годом. Воспользуемся аналитическим обзором мирового рынка робототехники Сбербанка [1]. По диаграмме динамики продаж профессиональной сервисной робототехники 2018 года можно заметить, что сервисная робототехника распространяется достаточно быстро. Видно, что продажи сервисной робототехники в 2014 году на порядок меньше нежели в 2021 году.

Так, по данным ассоциации промышленного транспорта ИТА США, в Америке, где на предприятиях задействовано более 855 тыс. складских вилочных погрузчиков, при их использовании происходит более 100 тыс. несчастных случаев в год. Среди других задач, решаемых роботами-погрузчиками, – повышение эффективности хранения продукции и выполнения операций, уменьшение

показателей убыли, увеличение оборачиваемости склада, повышение эффективности управления складом. В итоге, улучшив качество и производительность работы склада, производство получит максимальную выгоду и сведет потери к минимуму.

В основном рассматривается блок навигации, так как он самый значимый в верхнем уровне, и именно этот блок собирает данные, с которыми потом необходимо будет работать нижнему уровню.

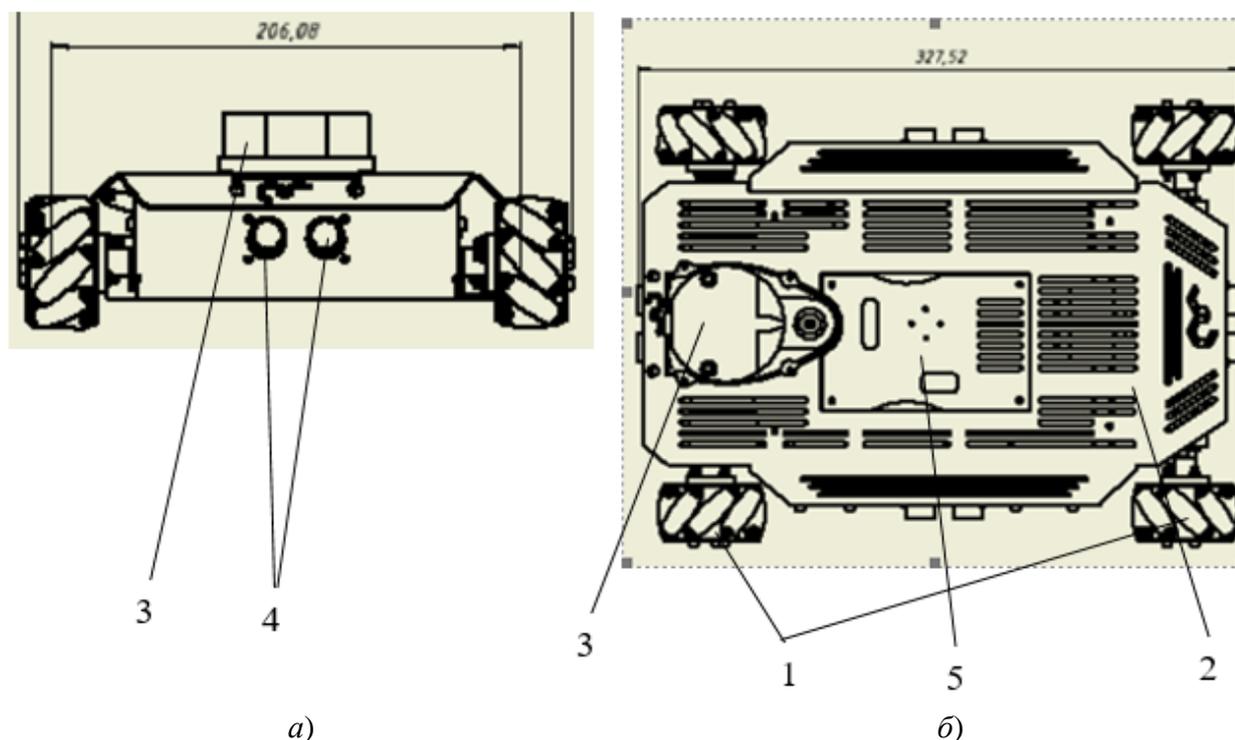


Рис.1. Ходовое оборудование на меканум колесах: а – вид спереди; б – вид снизу (1 – меканум колеса; 2 – корпус; 3 – лидар; 4 – дальномер; 5 – система управления)

Изменение пневмоколесного ходового оборудования на меканум колеса (рис. 1) позволит, во-первых, сократить межстеллажное пространство и увеличить маневренность машины за счет увеличения степеней свободы.

Ходовое оборудование на меканум колесах состоит из собственно меканум колес 1, установленных в корпусе 2, на котором располагается лидар 3 для оценки расстояния до предполагаемого препятствия в соответствии с маршрутной картой. Дублирование лидара осуществляется ультразвуковыми дальномерами 4. Внутри корпуса 2 расположена система управления 5 предлагаемого устройства передвижения на меканум колесах.

2. Постановка задачи

В качестве ходового оборудования погрузчиков используется пневмоколесное ходовое оборудование, которое при перемещении на плоскости имеет три степени свободы: перемещение вдоль осей x и y , расположенных в горизонтальной плоскости и вращение вокруг вертикальной оси z .

Роботы, находящиеся на службе у человека на территории складского хозяйства должны быть приспособлены к перемещениям в ограниченном пространстве, а также среди подвижных и неподвижных препятствий, то есть должны быть адаптированы к рабочему пространству, которое фиксируется по изменению спектра шумов (частоте и форме сигналов) создаваемых препятствиями [7, 8], рассматривая их как вероятностные функции, оцениваемые по плотности распределения вероятности.

Основной проблемой при перемещении роботов навигаторов является их ориентация в пространстве при встрече с подвижными и неподвижными объектами (препятствиями)

которое основано на вероятностной модели движения робота с дифференциальной кинематикой. Под кинематикой здесь понимается оценка позиции робота-навигатора по величинам изменения его линейной и угловой скоростей. Другими словами, зашумлению подвергаются преобразованные в линейную и угловую скорости показания энкодеров (измерительный преобразователь угла поворота вращающегося объекта в цифровые или аналоговые сигналы, которые позволяют определить угол его поворота).

При этом шумы модели настраиваются при помощи шести параметров $\alpha_1 - \alpha_6$, характеризующих изменения сигналов источников шумов и, являющиеся точечной характеристикой магнитуды колебаний (дисперсия b).

Здесь значение дисперсии b можно вычислить вычисляется по формуле:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{12} rand(-b, b),$$

где функция *rand* является выбором случайного значения из нормального распределения с математическим ожиданием равным 0 и дисперсией равной b .

3. Алгоритм решения задачи

Основными параметрами перемещения робота-навигатора на плоскости являются: ускорение (режим неустановившегося движения); скорость перемещения относительно осей x и y и поворота относительно собственной вертикальной оси z (появление угловых скоростей), которые возникают из-за конструктивных особенностей механум колес.

Движение модели (*Motion model*) при этом задается функцией в зависимости от положения робота-навигатора на плоскости:

$$\Phi(t) = (z_t, x_t, x_{t-1}),$$

где x_t, x_{t-1} – текущее и предшествующее значение изменения положения модели (позиции) за итерацию по оси x при изменении ее поворота относительно собственной оси z . Z_t .

Очевидно, что каждое последующее изменение положения робота на плоскости относительно оси x будет зависеть от угла его поворота φ относительно собственной оси z

через время Δt . Сказанное можно представить в виде системы двух уравнений:

$$\begin{aligned} y' &= y + \hat{v} \Delta t \sin \varphi; \\ x' &= x + \hat{v} \Delta t \cos \varphi. \end{aligned}$$

Исходя из сказанного для вероятностной оценки положения робота навигатора разработан алгоритм, приведенный ниже.

1. Рассчитать функцию (z_t, x_t, x_{t-1}) .
2. $\hat{v} = v + (\alpha_1 v^2 + \alpha_2 \omega^2)$.
3. $\hat{\omega} = \omega + (\alpha_3 v^2 + \alpha_4 \omega^2)$.
4. $\hat{\gamma} = (\alpha_5 v^2 + \alpha_6 \omega^2)$.
5. $\varphi' = \varphi + \hat{\omega} \Delta t + \hat{\gamma} \Delta t$.
6. Вернуться к расчету функции $x_t = (x', y', \varphi')$.

В расчетах в качестве приращения векторов линейной v и угловой ω скоростей, углов поворота φ приняты их изменения при каждой последующей итерации. Другими словами, к каждому предыдущему значению добавляется значение случайной величины (позиции 2, 3, 4, 5 алгоритма) которое определяется по зависимостям:

- изменение линейной скорости $(\alpha_1 v^2 + \alpha_2 \omega^2)$;
- изменение угловой скорости $(\alpha_3 v^2 + \alpha_4 \omega^2)$;
- при движении по криволинейной траектории $(\alpha_5 v^2 + \alpha_6 \omega^2)$

Сказанное проиллюстрировано на рис. 2, где можно качественно оценить влияние коэффициентов a_i на расхождение частиц при движении модели.

На рис. 2, *a* видно, что изменению угловой скорости соответствуют наибольшие значения коэффициенты $(a_3$ и $a_4)$. Изменению линейной скорости при прямолинейном движении (рис. 2, *б*) соответствуют коэффициенты a_1 и a_2 . На рис. 2, *в* показано движение робота-навигатора по криволинейной траектории, характеризующегося коэффициентами a_5 и a_6 .

На рис. 2, *a, б, в* видно, что разброс дисперсий во всех трех случаях носит различный характер, что оказывает влияние на выбор величины коэффициентов a_i . Таким образом при проведении эксперимента с реальной моделью робота, можно оценить величину параметры a_i , для каждой итерации, которые с достаточной близостью позволят

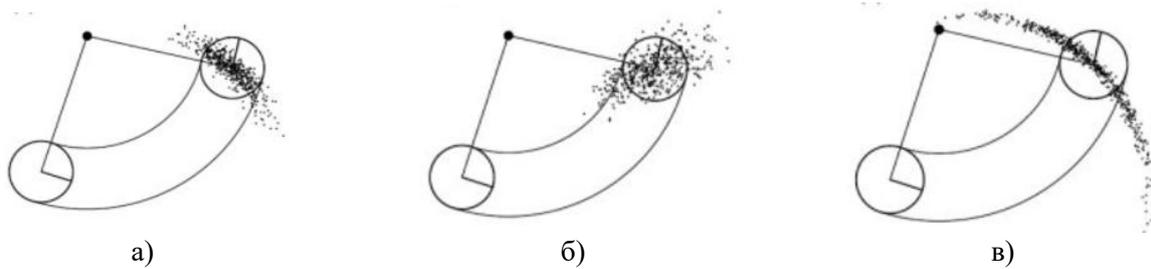


Рис.2. Схемы результата работы алгоритма модели движения при различных a_i

описывать вероятностную модель движения мобильной платформы на меканум колесах в ограниченном пространстве с препятствиями.

Перед применением расчетного алгоритма зашумления к симуляции, необходимо разработать метрику оценки качества работы алгоритма.

4. Метрика оценки

Так как показания линейной и угловой скорости по сути являются вероятностными распределениями, то наиболее объективной метрикой оценки на первый взгляд будет являть коэффициент корреляции между линейными и угловыми скоростями, снятыми с реального робота и смоделированными показателями. В качестве метода расчета удобно использовать коэффициент корреляции Питерсона [9]. Данный метод оценки подходит для расчета корреляции между двумя дискретными вероятностными величинами. Однако, после проведения предварительных расчетов выяснилось, что наибольшая корреляция достигается при полном отсутствии зашумления модели, из чего был сделан вывод, что данная метрика оценки не является валидной.

Поэтому было принято решение использовать в качестве основной метрики дисперсию, полученную при обработке массива данных, в виде изменения скоростей при каждой последующей итерации.

$$\Delta v_1 = v_r - v_{sim_ideal};$$

$$\Delta v_2 = v_{sim_noise} - v_{sim_ideal};$$

где v_r – массив линейных скоростей робота; v_{sim_ideal} – массив линейных скоростей, полученных из симуляции без добавления шума; v_{sim_noise} – массив линейных скоростей

полученных из симуляции с добавлением некоторого шума.

График разностей Δv_1 (рис. 3, а) и Δv_2 (рис. 3, б) соответствует движению робота на меканум колесах по случайной траектории длиной 3 метра. При этом для зашумления используется вышеописанный алгоритм с параметрами: $a_1 = a_2 = 0,3$; $a_3 = a_4 = a_5 = a_6 = 1,2$.

Для каждой из метрик вычислим среднее значение разностей скоростей $\Delta \bar{v}$ или их математическое ожидание :

$$\Delta \bar{v} = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta v_i}{n},$$

где n – число элементов массива.

Для каждой из метрик вычислим среднеквадратичное отклонение этих разностей:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (\Delta v_i - \Delta \bar{v})^2}{n}}.$$

Рассчитаем для разностей Δv_1 среднеквадратичное отклонение σ_1 , а для Δv_2 – σ_2 . Тогда итоговой метрикой будем считать:

$$m = |\sigma_1 - \sigma_2| \cdot 1000.$$

Аналогичный расчет проводим и для угловых скоростей. Метрику линейной скорости обозначим как m_v , а метрику угловой скорости как m_ω .

Расчеты обработки данных, приведенных на рис. 3 показали, что метрики для линейной и угловой скоростей при значениях a_i , принятых выше будут равны:

$$m_v = 1,11197; m_\omega = 1,84618.$$

Известно [10, 11], что чем меньше метрика, тем лучше работает алгоритм зашумления.

5. Экспериментальные исследования движения модели грузоподъемного средства на меканум колесах

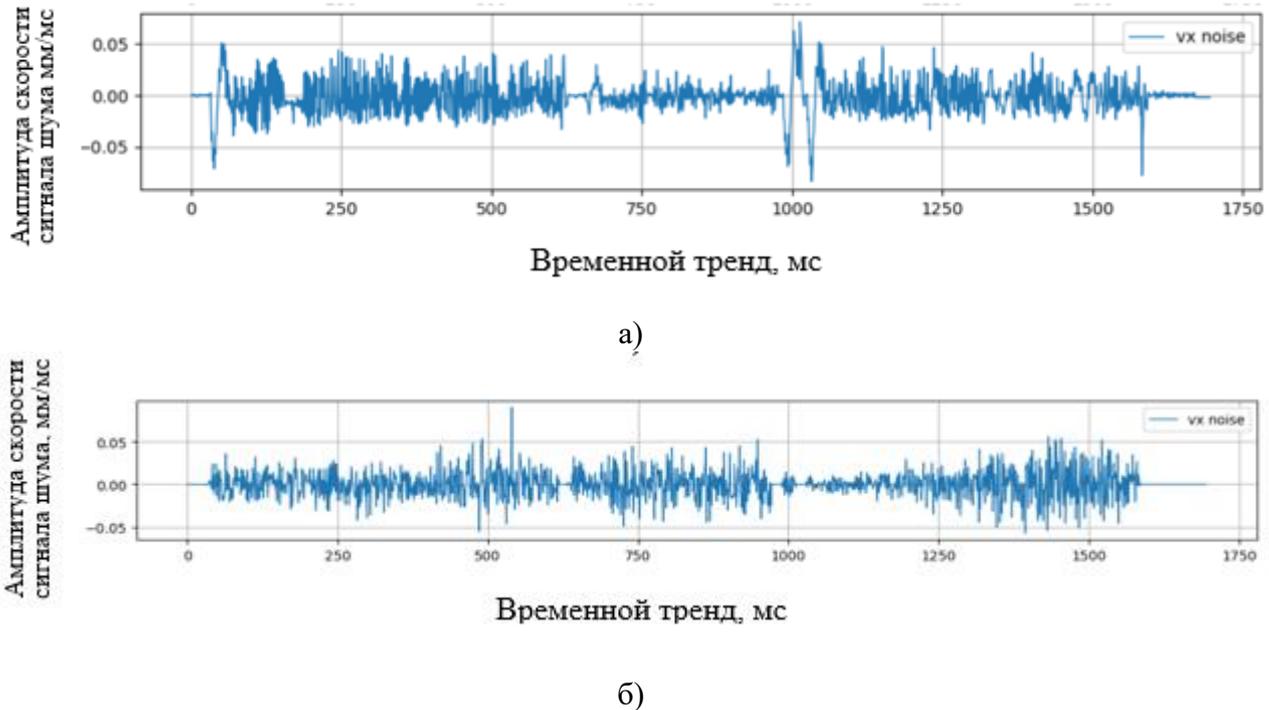


Рис. 3. Изменение разностей для движения по случайной траектории длиной 3 м^Λ
 а – Δv_1 ; б – Δv_2

Для проведения экспериментальных исследований с целью верификации алгоритма движения модели грузоподъемного средства на меканум колесах рассчитаем метрики для различных параметров a_i . Из описания алгоритма видно, что параметры a_1 и a_2 влияют только на линейную скорость робота, а a_3, a_4, a_5, a_6 на его угловую скорости, которая зависит от конструктивных особенностей формы тел вращения на меканум колесах.

Исходя из этого целесообразно определять метрики угловой и линейной скорости не зависимо друг от друга.

При проведении численного эксперимента считаем, что движение робота-навигатора происходит по случайной траектории длиной 3 метра. При этом будем считать, что характер траектории может быть прямолинейным и криволинейным.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка метрик m при различном движении робота-навигатора

Движение по случайной траектории при длине траектории 3 м					
a_1, a_2	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
m_v	13,98589	11,41110	10,26154	7,11197	8,03759
a_3, a_4, a_5, a_6	0,1	0,5	0,8	1,2	1,4
m_w	61,80137	39,99948	23,64807	8,84618	9,05475
Движение по прямолинейной траектории при длине траектории 3 м					
a_1, a_2	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
m_v	24,66234	17,31827	7,63011	12,05804	26,74619
a_3, a_4, a_5, a_6	0,1	0,5	0,8	1,2	1,4
m_w	19,02079	39,64554	83,64528	142,31161	171,64477
Движение при вращении на месте					
a_1, a_2	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
m_v	7,62077	26,90192	65,46424	104,02655	142,58887
a_3, a_4, a_5, a_6	0,1	0,5	0,8	1,2	1,4
m_w	90,62203	74,7109	198,7106	364,04353	446,71214

Окончание табл. 1

Движение по случайной траектории при длине траектории 13 м					
a_1, a_2	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
m_v	9,04444	8,90192	26,6099	94,23245	120,87176
a_3, a_4, a_5, a_6	0,1	0,5	0,8	1,2	1,4
m_w	17,86581	8,66975	41,48732	129,88421	280,78123

Анализ полученных данных позволил установить, что:

- разработанный выше алгоритм позволяет осуществлять работу предлагаемой установки в не полностью заданном объеме заданном диапазоне, о чем свидетельствует разброс данных табл. 1 при движении по случайной траектории на длине 3 и 13 м. В первом случае при величине коэффициентов $a_1, a_2 = 0,2$ имеется экстремум метрики, а во втором она изменяется так же как и тестовая платформа. Сказанное свидетельствует о неустановившемся режиме движения системы.

- изменение траектории движения требует перенастройки параметров зашумления, которая в отдельных случаях может быть критичной;

- сложность настройки алгоритма из-за большого числа вводимых параметров.

Для устранения этих недостатков предлагается усовершенствовать настройки алгоритма за счет генерации шумов.

6. Генерация новой настройки алгоритма движения модели грузоподъемного средства на меканум колесах

При анализе графиков линейной и угловой скорости, полученных с реального робота и с симуляции без зашумления (рис. 4) можно заметить, что при резком росте скорости перемещения робота-навигатора наблюдается существенное перерегулирование.

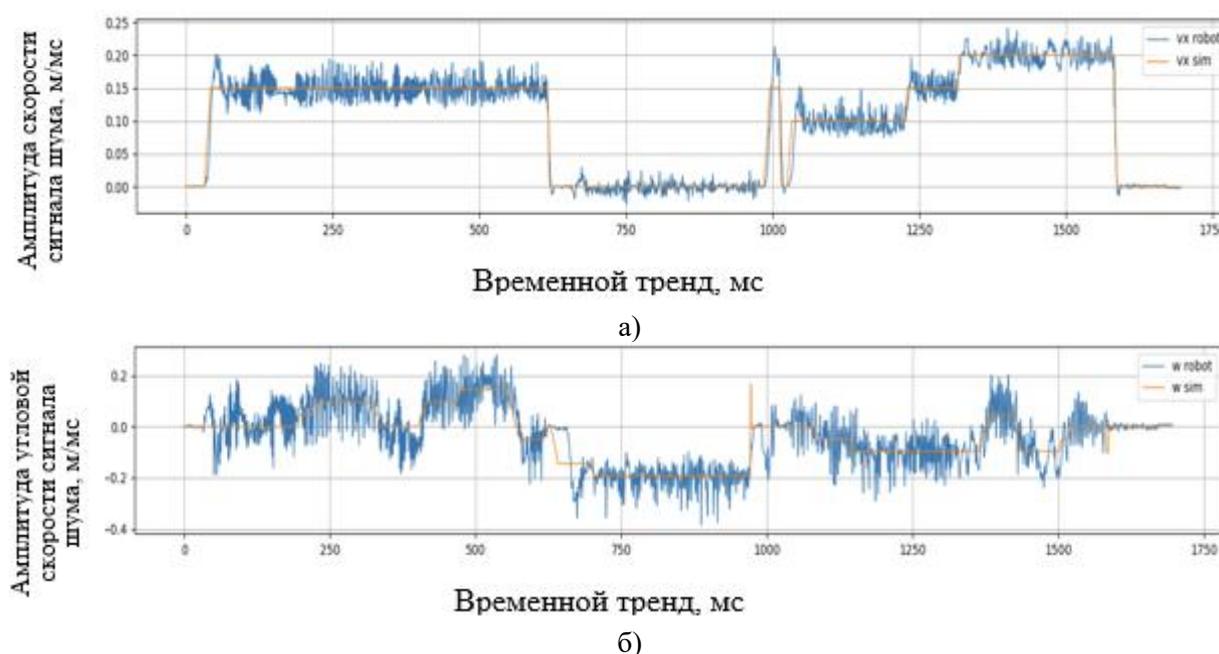


Рис.4. Изменение скорости перемещения реального робота и симуляции наложенные друг на друга: а – линейная скорость; б – угловая скорость

На рис. 4 видно, что реальные скорости и симуляции совпадают как при линейном, так и угловом перемещении.

Из этого следует, что при генерации шума необходимо учитывать не только линейное и угловое ускорение мобильной платформы, а также генерировать шум на этапе

получения скорости каждого из механум колес движителя.

Исходя из изложенного выше предлагается следующий алгоритм зашумления.

1. Вводим функцию зашумления (*функция зашумления model*) в виде:

$$\Phi(t) = (z_t, z_{t-1}, x_{t-1})$$

При этом изменение положения платформы на механум колесах будет характеризоваться вводимыми величинами:

$$a_l = v_{l_t} - \widehat{v_{l_{t-1}}},$$

$$a_r = v_{r_t} - \widehat{v_{r_{t-1}}}.$$

Здесь a_l, a_r – величины пропорциональные ускорению, которое совершили приводы за время между измерениями скорости; v_{l_t}, v_{r_t} – скорости измеренные за текущую итерацию; $\widehat{v_{l_{t-1}}}, \widehat{v_{r_{t-1}}}$ – скорости сгенерированные за прошлую итерацию.

2. Учитывая, что время между итерациями считывания одинаково, при проведении расчетов можно им пренебречь. Поэтому каждое последующее значение итераций определяем по зависимостям:

$$\widehat{v_{l_t}} =$$

$$= v_{l_t} + \text{случайное значение}(a_l \cdot a_0) + \text{случайное значение}(v_{l_t} \cdot a_1);$$

$$\widehat{v_{r_t}} = v_{r_t} + \text{случайное значение}(a_r \cdot a_0) + \text{случайное значение}(v_{r_t} \cdot a_1),$$

где

$$\widehat{v} = \frac{R \cdot (\widehat{v_{l_t}} + \widehat{v_{r_t}})}{2},$$

$$\widehat{w} = \frac{R \cdot (\widehat{v_{l_t}} - \widehat{v_{r_t}})}{2 \cdot L}.$$

Здесь R – радиус колес; L – расстояние между колесами.

3. Изменение линейных скоростей и угловых скоростей оцениваем позависимостям:

$$y' = y + \widehat{v} \Delta t \sin \varphi;$$

$$x' = x + \widehat{v} \Delta t \cos \varphi,$$

$$\varphi' = \varphi + \widehat{w} \Delta t.$$

4. Вернуть $x_t = (x', y', \varphi')$

Здесь случайное значение величин, приведенных выше является случайным числом из нормального распределения с математическим ожиданием равным нулю и дисперсией равной величине, задаваемой в функцию.

Результаты проведения экспериментальных исследований новой сгенерированной настройки и алгоритма представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований по оценке метрик m сгенерированной настройки и алгоритма при a_2 и переменных значениях a_1

Движение по случайной траектории длиной три метра при раз					
$a_2 = 0,1$					
a_1	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3
m_v	7,67891	3,95764	7,33808	7,04029	6,68106
m_ω	25,09496	25,23138	22,82328	23,03341	21,42076
$a_1 = a_2 = 0,1$					
m_v	15,5561	11,82338	3,44048	2,50245	11,6109
m_ω	62,6549	45,34628	24,71767	19,08434	62,74281
При движения по прямолинейной траектории длиной 3 м					
$a_2 = 0,1$					
a_1	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3
m_v	16,15527	10,17649	15,94065	15,67394	15,17428
m_ω	39,61516	45,35027	40,46344	42,70154	44,31093
$a_1 = a_2 = 0,1$					
m_v	30,3126	23,83093	15,10092	1,05799	14,67056
m_ω	25,83512	5,26512	45,10654	113,60758	176,13372
При вращении на месте					
$a_2 = 0,1$					
a_1	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3
m_v	5,01814	5,05378	5,1855	4,91007	4,97373
m_ω	100,65363	100,56684	101,28392	100,78401	99,90734

Окончание табл. 2

$a_1 = a_2 = 0,1$					
m_v	10,97512	8,31525	5,05282	1,46553	8,24708
m_ω	128,21595	117,10135	101,65922	70,08924	40,30782
При движении по случайной траектории длиной 13 метров					
$a_2 = 0,1$					
a_1	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3
m_v	8,13098	6,47908	3,1615	7,29111	8,02527
m_ω	72,50238	70,40461	69,77978	67,99583	75,72772
$a_1 = a_2 = 0,1$					
m_v	17,65954	6,55839	3,86822	36,67341	61,71381
m_ω	50,1101	0,46632	69,75752	200,11591	333,15045

Графическая интерпретация результатов работы сгенерированного алгоритма и реального робота представлены на рис. 5.

В табл. 2 и на рис. 5 на основе полученных метрик видно, что разработанный алгоритм в данном случае справляется с задачей зашумления эффективнее, чем алгоритм из без генерации. Кривые зависимости от уве-

личения коэффициента a_1 носят возрастающий характер. Достоверность полученных результатов подтверждена сходимостью результатов в третьем столбце табл. 3 при равенстве коэффициентов a_1 и a_2 . Расхождение результатов отличается на 4...6%.

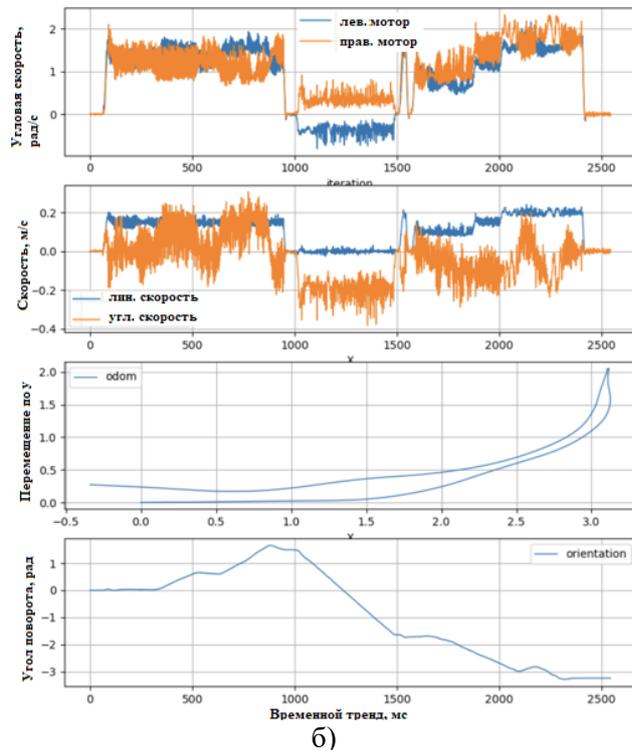
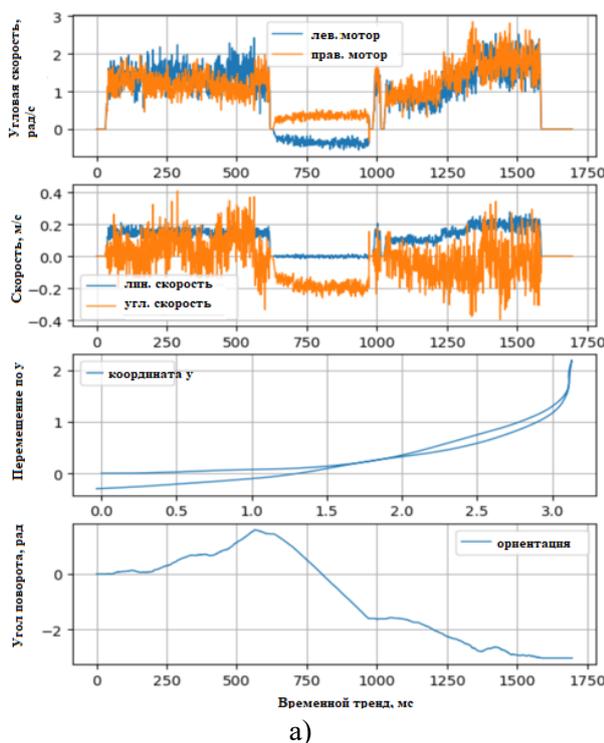


Рис. 5. Результаты работы: а – генерированного алгоритма; б – реального робота

Также существенным плюсом предлагаемого алгоритма с использованием генерации шумов является простота его настройки, реализуемая благодаря наличию всего двух параметров. Также для настройки алгоритма можно использовать алгоритмы оптимизации, на-

пример, градиентный спуск, так как требуется оптимизация всего двух параметров.

7. Заключение

Установлено, что:



- разработанная симуляционная модель позволяет имитировать реальное общественное пространство;

- разработанные алгоритмы зашумления сенсорных данных для максимального приближения симуляционной модели совпадают с реальным роботом (тестовым).

- для симуляции шумов колесной одометрии разработанный на основе стандартной

модели движения алгоритм можно использовать в качестве входных данных показания скорости колес, а не всей модели АСР.

- разработанная метрика оценки качества алгоритма в сравнительном варианте с использованием генерации шумов показывает высокую степень сходимости со стандартными данными.

Список литературы

1. Малкахи Д.Э. Руководство по выполнению заказов и организации погрузочно-разгрузочных работ. Москва, Экспо, 2014. 459 с.

2. Балуев М.С. Подход к оптимизации состава технических средств механизации для выполнения погрузочно-разгрузочных работ // *Сборник научных статей 4-й международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития современного общества»*. Курск, Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 9-12.

3. Курбанов Т.Х., Шаламов Д.А. Эволюция и тенденции развития складской инфраструктуры военной организации государств // *Сборник статей III международной научно-практической конференции «Тенденции развития материально-технического обеспечения военной организации государства в современных условиях»*. Пермь, 2017. С. 367-371.

4. Курбанов Т.Х., Плотников В.А. Оценка перспектив развития логистики в условиях цифровизации экономики и трансформации социальной сферы // *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2020. 3 (123). С. 94-101.

5. Karabegović I., Karabegović E., Mahmić M., Husak E. The application of service robots for logistics in manufacturing processes // *Advances in Production Engineering and Management*. 2015. Vol. 10. 4. С. 185-194.

6. Демури́н Ю.А. Совершенствование технологий складского распределения в условиях цифровой экономики // *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2020.

References

1. Malkahi D.E. *Rukovodstvo po vypolneniyu zakazov i organizacii pogruzochno-razgruzochnyh rabot*. Moscow, EXPO, 2014, 459 p. (In Russian)

2. Baluev M.S. Podhod k optimizatsii sostava tekhnicheskikh sredstv mekhanizatsii dlya vypolneniya pogruzochno-razgruzochnykh rabot. *Sbornik nauchnykh statey 4 mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnye voprosy razvitiya sovremennogo obshchestva»*. Kursk, Yugo-Zap. gos. un-t, 2020. pp. 9-12. (In Russian)

3. Kurbanov T.H., Shalamov D.A. Evolyuciya i tendencii razvitiya skladskoj infrastruktury voennoj organizacii gosudarstva. *Sbornik statej III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Tendencii razvitiya material'no-tehnicheskogo obespecheniya voennoj organizacii gosudarstva v sovremennyh usloviyah»*. Perm, 2017. pp. 367-371. (In Russian)

4. Kurbanov T.H., Plotnikov V.A. Ocenka perspektiv razvitiya logistiki v usloviyah cifrovizacii ekonomiki i transformacii social'noj sfery. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2020. 3 (123). pp. 94-101. (In Russian)

5. Karabegović I., Karabegović E., Mahmić M., Husak E. The application of service robots for logistics in manufacturing processes. *Advances in Production Engineering & Management*. 2015. Vol. 10, No. 4, 185-194.

6. Demurin Yu.A. Sovershenstvovanie tekhnologij skladskogo raspredeleniya v

Vol. 10. № 5A.

7. Винокуров С.А., Кочемасов В.Н., Сафин А.Р. Генераторы шума (обзор) // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. 4. С. 6–32.

8. Thrun S., Burgard W., Fox D., Arkin R.C. Probabilistic Robotics. MIT press, 2005. 295 p.

9. Schober P., Boer C., Schwarte. L. Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation // Anesthesia and Analgesia. 2018. 126. ANE.0000000000002864.

10. Li X., Xiaofei S., Yuxian M., Junjun L., Fei W., Li J. Dice Loss for Data-imbalanced NLP Tasks. 2019. 545 p.

11. Shehata A., Sherien M., Abdallah M., Ragab M. A Survey on Hough Transform, Theory, Techniques and Applications. 2015. 348 p.

† usloviyah cifrovoj ekonomiki. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2020. Vol. 10, No.5A. (In Russian)

† 7. Vinokurov S. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Generatory shuma (obzor). *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika*. 2023. 26. 4. pp. 6–32.

† 8. Thrun S., Burgard W., Fox D., Arkin R.C. Probabilistic Robotics. MIT press, 2005. 295 p.

† 9. Schober P., Boer C., Schwarte. L. Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia and Analgesia*. 2018. 126. ANE.0000000000002864.

† 10. Li X., Xiaofei S., Yuxian M., Junjun L., Fei W., Li J. Dice Loss for Data-imbalanced NLP Tasks. 2019. 545 p.

† 11. Shehata A., Sherien M., Abdallah M., Ragab M. A Survey on Hough Transform, Theory, Techniques and Applications. 2015. 348 p.