

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1089-1097

УДК 004.942

Разработка квазиоптимального алгоритма переключения мобильного робота

Дмитрий Николаевич Захаров¹, Александр Дмитриевич Панин²,
Андрей Михайлович Яременко³✉, Дмитрий Романович Алиев⁴, Максим Игоревич Дербин⁵,
Олег Игоревич Борисов⁶

^{1,2,3,4,5,6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ dnzakharov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9017-1505>

² sashapanin220103@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-0209-878X>

³ amyaremenko@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0007-7220-3957>

⁴ dmitrii_aliev@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4057-965X>

⁵ matius_d@list.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6451-0485>

⁶ borisov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2861-746X>

Аннотация

Введение. Всенаправленные мобильные платформы, известные своей маневренностью в ограниченных пространствах, часто сталкиваются не только с проблемами энергоэффективности из-за конструкции роликонесущих колес, но и с ограничениями при движении в реальных условиях эксплуатации, такими как перепады высот и неровности рельефа. Для преодоления ограничений мобильных платформ необходимо обеспечить возможность переключения между всенаправленным и классическим режимами движения с помощью адаптивного переключения режимов движения. Такой подход позволяет сочетать маневренность при навигации в тесных условиях с повышенной проходимостью и энергоэффективностью на неровных поверхностях и уклонах. **Метод.** В работе предложен алгоритм адаптивного переключения режимов движения, обеспечивающий переход от всенаправленной к классической кинематической схеме и обратно с помощью разработанного компактного механизма переключения. Для этого использованы усовершенствованные кинематические, динамические и энергетические модели в сочетании с лабораторными экспериментами с реконфигурируемой платформой. Предложенные усовершенствования позволяют осуществить простой и быстрый переход из одной кинематической схемы в другую с помощью разработанного компактного механизма переключения. **Основные результаты.** Экспериментальные исследования выполнены в лабораторных условиях на ровной бетонной поверхности, где робот выполнял движение по замкнутой траектории. В ходе эксперимента фиксировались энергопотребление и ошибки отслеживания траектории для голономного, неголономного и реконфигурируемого режимов движения. Сравнительный анализ показал, что применение предложенного алгоритма переключения позволяет снизить энергозатраты в среднем на 8 % при сохранении маневренности. Для более крупных роботов с массой, значительно превышающей массу механизма реконфигурации, экономия энергии в реальных сценариях может быть больше за счет оптимизации системой использования энергии и выбора наиболее эффективной конфигурации для различных сегментов траектории. Система сохраняет высокую маневренность и обеспечивает эффективную навигацию в сложных условиях. **Обсуждение.** Представленный алгоритм позволяет платформе достичь важного баланса между мобильностью, эффективностью и точностью управления. Появляется возможность практического внедрения реконфигурируемых роботов в реальных сервисных приложениях. Полученные результаты имеют практическое значение для проектирования адаптивных механических и управляющих систем с повышенной эксплуатационной гибкостью мобильных платформ в условиях ограниченных ресурсов.

Ключевые слова

мобильный робот, роликонесущее колесо, всенаправленный робот, гибридная голономность, квазиоптимальный алгоритм

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00713).

Ссылка для цитирования: Захаров Д.Н., Панин А.Д., Яременко А.М., Алиев Д.Р., Дербин М.И., Борисов О.И. Разработка квазиоптимального алгоритма переключения мобильного робота // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 6. С. 1089–1097. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1089-1097

© Захаров Д.Н., Панин А.Д., Яременко А.М., Алиев Д.Р., Дербин М.И., Борисов О.И., 2025

Experimental study of a quasi-optimal mobile robot switching algorithm**Dmitry N. Zakharov¹, Alexandr D. Panin², Andrey M. Iaremenko³✉, Dmitry R. Aliev⁴, Maksim I. Derbin⁵, Oleg I. Borisov⁶**^{1,2,3,4,5,6} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation¹ dnzakharov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9017-1505>² sashapanin220103@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-0209-878X>³ amyaremenko@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0007-7220-3957>⁴ dmitrii_aliev@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4057-965X>⁵ matius_d@list.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6451-0485>⁶ borisov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2861-746X>**Abstract**

Omnidirectional mobile platforms, known for their exceptional maneuverability in confined spaces, often encounter not only energy efficiency challenges due to the design of roller-bearing wheels but also operational limitations in real-world environments such as height differences and uneven terrain. To overcome these limitations, it is necessary to enable switching between omnidirectional and conventional driving modes through adaptive motion mode switching. This approach combines the maneuverability required for navigation in tight spaces with improved off-road capability and energy efficiency on uneven surfaces and slopes. This study proposes an algorithm for adaptive motion mode switching, providing transitions from an omnidirectional to a classical kinematic scheme and back via a specially developed compact switching mechanism. To achieve this, enhanced kinematic, dynamic, and energy models were utilized in combination with laboratory experiments conducted on a reconfigurable platform. The proposed improvements make it possible to perform a simple and rapid transition between kinematic configurations using the compact switching mechanism. Experimental studies were carried out under laboratory conditions on a flat concrete surface where the robot followed a closed trajectory. During the experiments, energy consumption and trajectory-tracking errors were recorded for holonomic, nonholonomic, and reconfigurable motion modes. Comparative analysis demonstrated that the proposed switching algorithm reduces energy consumption by an average of 8 % while maintaining maneuverability. For larger robots whose total mass significantly exceeds that of the reconfiguration mechanism energy savings in real-world scenarios can be even greater due to the system ability to optimize energy usage and select the most efficient configuration for different trajectory segments. The system retains high maneuverability and ensures efficient navigation in complex environments. The presented algorithm enables the platform to achieve a crucial balance between mobility, efficiency, and control accuracy. This opens the possibility for the practical implementation of reconfigurable robots in real-world service applications. The obtained results have practical significance for the design of adaptive mechanical and control systems that enhance the operational flexibility of mobile platforms under resource-constrained conditions.

Keywords

mobile robot, wheel with rollers, omnidirectional robot, hybrid holonomy, quasi-optimal algorithm

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 25-29-00713.

For citation: Zakharov D.N., Panin A.D., Iaremenko A.M., Aliev D.R., Derbin M.I., Borisov O.I. Experimental study of a quasi-optimal mobile robot switching algorithm. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 6, pp. 1089–1097 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1089-1097

Введение

Сервисная робототехника — быстро развивающаяся область, которая имеет множество применений в различных сферах человеческой деятельности [1]. Мобильные платформы используются для решения задач, связанных с уборкой, доставкой [2], инспектированием, мониторингом и спасательными операциями [3]. Разработка всенаправленных платформ считается одним из наиболее перспективных направлений в наземной робототехнике [4–6]. Эти роботизированные платформы обладают высокой маневренностью в ограниченных пространствах, что позволяет использовать их в сложных условиях. Однако всенаправленные платформы имеют значительные ограничения, связанные с их конструкцией. Классические всенаправленные платформы оснащены колесами с роликами, которые свободно вращаются вокруг своей оси, что приводит к высокому энергопотреблению и снижению безопасности и являются критическими факторами

для мобильных сервисных роботов. В работе [7] выполнен анализ различных конструкций мобильных роботов, включая всенаправленные роботы, и рассмотрено их энергопотребление и безопасность. В отечественном промышленном секторе остаются многочисленные предприятия, которые при проектировании не предусматривали роботизацию. Тем не менее именно они сегодня требуют внедрения мобильных роботов с реконфигурируемыми механизмами, способными адаптироваться к особенностям существующей инфраструктуры, такими как неравномерность напольного покрытия.

Существует ряд исследований, в которых ученые применяют адаптивные алгоритмы для улучшения характеристик таких роботов. В работе [8] представлен алгоритм адаптивного нечеткого динамического управления поверхностью для отслеживания траектории мобильного робота с четырьмя всенаправленными колесами, предназначенный для адаптивной настройки контроллера в ответ на изменения в динамике робота

или наличие неопределенностей. В [9] рассмотрены методы и алгоритмы большого роя роботов, обеспечивающие их управляемость в динамически изменяющихся условиях. Методы синтеза интеллектуальных систем управления для мобильных роботов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды, обсуждаются в работе [10]. В [11] разработан механизм, позволяющий всенаправленному роботу с роликонесящими колесами реконфигурировать в обычного четырехколесного робота.

В настоящей работе представлена разработка алгоритма энергоэффективного управления системой реконфигурации, основанный на кинематическом, динамическом и энергетическом анализе ранее разработанного робота [11]. Данный алгоритм, использующий базовый контроллер отслеживания траектории, переключает механизм реконфигурации между обычным и всенаправленным режимами, минимизируя потребление энергии и погрешность отслеживания, одновременно позволяя роботу следовать по заранее заданным траекториям с помощью простых стратегий управления.

Описание предлагаемой методики

Методика основана на сравнительном анализе энергопотребления и точности отслеживания траектории в различных режимах движения. Для этого использовались усовершенствованные кинематические, динамические и энергетические модели, а также лабораторные эксперименты с реконфигурируемой платформой. Общая схема управления показана на рис. 1.

Рассматривается робот с двойным режимом мобильности как объект управления с переменной структурой, режим которого (голономный или неголономный) может быть изменен с помощью представляемого ме-

ханизма реконфигурации. Предложенные в настоящей работе математические модели (кинематическая, динамическая и энергетическая) позволили синтезировать алгоритм переключения механизма реконфигурации. Полученный алгоритм обеспечивает баланс между энергоэффективностью и точностью при движении по траектории. Алгоритм принимает желаемую траекторию в качестве входных данных и вычисляет квазиоптимальный режим для каждого из ее сегментов на основе данных моделирования. Отслеживание траектории выполняется с применением базового контроллера.

Центральным устройством в системе, осуществляющим переход между режимами, является устройство реконфигурации (рис. 2).

Сжатый воздух подается во внутреннюю камеру 5 через поворотный быстросъемный фитинг 1, расположенный на оси вращения колеса, посредством ниппеля 3. Ниппель 3 является частью внутренней камеры (как у велосипедов) и ввинчен в вал 2. Внутренняя камера 5 надувается, равномерно расширяясь и воздействуя на ролики колеса 6. Прижимная пластина 7 обеспечивает улучшенное сцепление камеры 5 с роликом 6.

Математическая модель робота с устройством реконфигурации

Кинематическая модель. Кинематическая модель робота с устройством реконфигурации может быть представлена следующим образом:

$$[\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4]^T = J_h [V_x \ V_y \ \omega_z],$$

где ω_i — угловая скорость i -го колеса; V_x, V_y, ω_z — линейные и угловые скорости в локальной системе координат. Согласно [12],

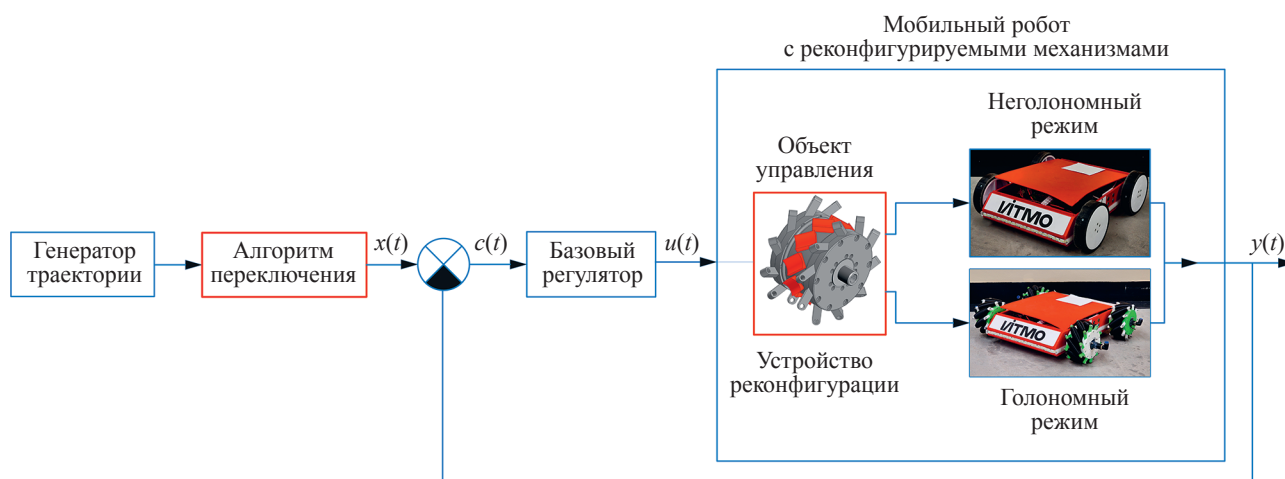


Рис. 1. Схема управления мобильным роботом с реконфигурируемыми механизмами.

$x(t)$ — желаемое положение; $e(t)$ — ошибка рассогласования между реальным положением и желаемым; $u(t)$ — управляющее воздействие; $y(t)$ — действительное положение

Fig. 1. Control scheme of a mobile robot with reconfigurable mechanisms.

$x(t)$ — desired position, $e(t)$ — error between the actual position and the desired position, $u(t)$ — control input, and $y(t)$ — actual position

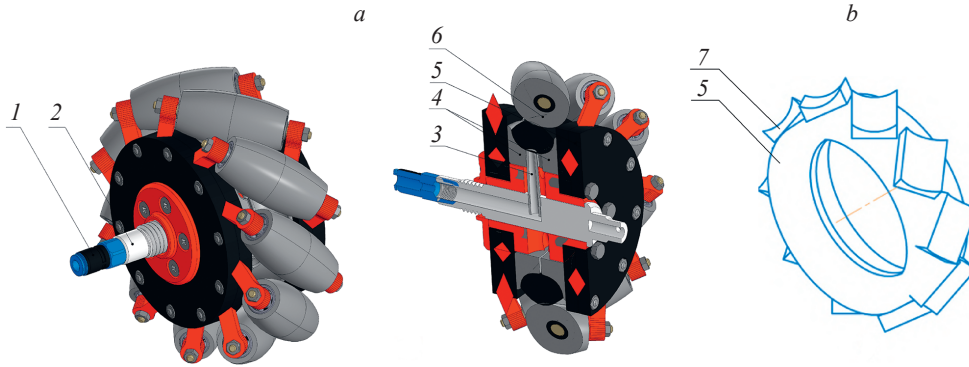


Рис. 2. Устройство механизма реконфигурации: колесо в сборе (а), конструкция блокирующего устройства (б).

1 — поворотный вставной фитинг; 2 — вал с отверстием для подачи и отвода воздуха; 3 — ниппель; 4 — ограничитель для укладки внутренней трубки; 5 — пневматическая камера; 6 — колесный ролик; 7 — прижимная пластина

Fig. 2. Reconfiguration mechanism device: assembled wheel (a); design of the locking device (b).

1 — rotary push-in fitting; 2 — shaft with an air supply and exhaust hole; 3 — nipple; 4 — retainer for inner tube placement; 5 — pneumatic chamber; 6 — wheel roller; 7 — pressure plate

$$\mathbf{J}_h = \begin{cases} \mathbf{J}_{nh} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -1 & 0 & -L & -W \\ -1 & 0 & -L & -W \\ 1 & 0 & -L & -W \\ 1 & 1 & -L & -W \end{bmatrix}, & \text{если ролики заблокированы,} \\ \mathbf{J}_m = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -L & -W \\ -1 & 1 & -L & -W \\ 1 & -1 & -L & -W \\ 1 & 0 & -L & -W \end{bmatrix}, & \text{если ролики не заблокированы,} \end{cases}$$

где \mathbf{J}_h , \mathbf{J}_{nh} и \mathbf{J}_m — матрицы Якоби для гибридного, неголономного и голономного роботов; r — радиус колеса; L и W — расстояния до колес по осям x и y .

Динамическая модель. Рассмотрим динамическую модель гибридного робота, используя полученную кинематическую модель:

$$\mathbf{M}_h(q)\ddot{q} = \mathbf{J}_h^1(\tau + \mathbf{F}_f r),$$

где \mathbf{M}_h — матрица массы и инерции; τ — вектор моментов колес робота; \mathbf{F}_f — сила трения; \mathbf{J}_h^1 — псевдообратная матрица Якоби.

При этом матрица \mathbf{M}_h :

$$\mathbf{M}_h = \begin{cases} \mathbf{M}_{nh} = \begin{bmatrix} \rho_1 \cos^2(\theta) & \frac{\rho_1 \sin(2\theta)}{2} & 0 \\ \frac{\rho_1 \sin(2\theta)}{2} & \rho_1 \sin^2(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & \rho_1 \end{bmatrix}, & \text{если ролики заблокированы,} \\ \mathbf{M}_m = \begin{bmatrix} \rho_2 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{I_w(L+W)^2 + I_r r^2}{(L+W)^2} \end{bmatrix}, & \text{если ролики не заблокированы,} \end{cases}$$

где $\rho_1 = \frac{1}{2} m_r r^2 + I_w + \frac{I_r r^2}{4(L+W)^2}$, $\rho_2 = I_w + \frac{m_r r^2}{2}$. Здесь I_w — момент инерции колеса относительно его оси; I_r — момент инерции робота относительно вертикальной оси; m_r — масса робота с учетом колес.

Для полученной динамической модели роботов применим модель трения всенаправленного робота, предложенную в работе [13]:

$$\mathbf{f}_{i,s} = \mu_s \mathbf{N}_i \text{sgn}(\mathbf{V}_{i,p}) \hat{\mathbf{u}}_{i,p},$$

$$\mathbf{f}_{i,r} = \mu_r \mathbf{N}_i \text{sgn}(\mathbf{V}_{i,p}) \hat{\mathbf{u}}_{i,p},$$

$$\mathbf{f}_{i,v} = \mu_v \mathbf{N}_i \mathbf{V}_{i,p},$$

где $\mathbf{f}_{i,s}$ — сила трения скольжения; $\mathbf{f}_{i,r}$ — сила трения качения; $\mathbf{f}_{i,v}$ — сила вязкого трения; $\mathbf{V}_{i,p}$ — скорость контактного ролика i -го колеса; $\hat{\mathbf{u}}_{i,p}$ — единичный вектор; μ_s — коэффициент трения скольжения; μ_r — коэффициент трения качения; μ_v — коэффициент вязкого трения; \mathbf{N}_i — реактивная сила i -го колеса.

Энергетическая модель. Согласно [13], общее энергопотребление робота при движении по траектории выразим в виде:

$$\begin{aligned} E_r &= E_k + E_f + E_e + E_m + E_d = \\ &= \int_{t_i}^{t_f} T dt + \int_{t_i}^{t_f} \mu_s N v + (\mu_v N v) v dt + R_a \int_{t_i}^{t_f} I_m^T \mathbf{I}_m dt + \\ &\quad + M_R \int_{t_i}^{t_f} \dot{\theta} dt + \int_{t_i}^{t_f} P_d dt, \end{aligned}$$

где E_k — потребление энергии для перемещения платформы; E_f — энергия, рассеиваемая на трение; E_e — энергия на преодоление момента трения; E_m — энергия, рассеиваемая в приводах; E_d — энергопотребление на оборудование робота; $[t_i, t_f]$ — временной интервал; T — кинетическая энергия; v — линейная скорость точки контакта колеса с поверхностью; R_a — сопротивление цепи якоря; M_R — момент трения; P_d — общая мощность всех устройств; \mathbf{I}_m — вектор тока электродвигателей:

$$\mathbf{I}_m = [I_{m1} \quad I_{m2} \quad I_{m3} \quad I_{m4}]^T.$$

При этом, помимо энергетических параметров, зависящих от времени и состояния, необходимо учитывать мгновенную энергию, затрачиваемую на переключение из голономного в неголономный режим и обратно. Для перехода из голономного в неголономный режим необходимо активировать устройство реконфигурации (заблокировать ролики колеса). Это требует нагнетания воздуха в камеру запорного устройства с помощью компрессора, что потребляет энергию следующим образом:

$$E_c = \frac{\frac{\gamma}{\gamma-1} P_1 K \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\eta},$$

где E_c — энергия, потребляемая компрессором; γ — адиабатический показатель; P_1 — начальное давление в системе; P_2 — конечное давление; K — общий объем камер запорного устройства; η — коэффициент полезного действия компрессора. Кроме того, энергия должна быть затрачена на подачу сжатого воздуха к запорному механизму путем активации реле.

Таким образом, получим выражение энергии, потребляемой для активации устройства блокировки роликов:

$$E_l = P_r t_l + E_c,$$

где P_r — мощность реле; t_l — время накачивания камер.

Для перехода из неголономного режима в голономный необходимо открыть реле, сбрасывая давление воздуха из камеры наружу. Рассчитаем энергию, необходимую для обратного перехода:

$$E_o = P_r t_o + E_c,$$

где t_o — время спуска воздуха из камер.

Проектирование закона управления

Базовый регулятор. Для решения задачи слежения за траекторией был синтезирован регулятор на основе наблюдателя с высоким коэффициентом усиления, описанный в работе [14].

Алгоритм переключения. Учитывая траекторию, цель состоит в минимизации следующего функционала:

$$Q = \int_0^T (E + H \|q_e\|) dt,$$

где E — значение энергии; q_e — ошибка отслеживания; H — весовой коэффициент.

Введение функционала Q мотивировано компромиссом между энергоэффективностью и точностью позиционирования мобильных платформ. В частности, платформа с роликонесущими колесами обычно демонстрирует меньшую энергоэффективность по сравнению с платформой на обычных колесах. Однако кинематические ограничения, накладываемые в неголономном режиме движения, снижают точность позициониро-

вания, особенно при резких маневрах. Функционал Q балансирует два данных аспекта с помощью весового коэффициента H .

Алгоритм принимает на вход траекторию и весовой коэффициент H . На выходе он формирует план переключения, представленный в виде временного массива моментов переключения. Для этого траектория разбивается на прямолинейные и криволинейные участки на основе заранее заданного порога кривизны. Далее моделируется энергопотребление для каждого режима движения вдоль траектории, и значение функционала Q вычисляется для каждого сегмента.

Строится план переключения по следующей схеме.

Даны: массивы \mathbf{Q} : $\mathbf{Q}^0 = [q_1^0, q_2^0, \dots, q_n^0]$ (состояние механического робота); $\mathbf{Q}^1 = [q_1^1, q_2^1, \dots, q_n^1]$ (состояние неголономного робота) и затраты на переход: $c_{0 \rightarrow 1} = \text{const}_1$, $c_{1 \rightarrow 0} = \text{const}_2$.

Цель — найти последовательность состояний $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_n]$, которая минимизирует:

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n q_i^{s_i} + \sum_{\text{переходы}} c_{S_i \rightarrow S_{i+1}}.$$

Для достижения цели рассматриваются:

- $dp_0[i]$ — минимальная энергия до этапа i в состоянии 0, $dp_0[1] = e_1^0$;
- $dp_1[i]$ — минимальная энергия до этапа i в состоянии 1, $dp_1[i] = e_1^1$.

Вводится рекуррентное соотношение для ($2 \leq i \leq n$):

$$dp_0[i] = q_i^0 + \min(dp_0[i-1], dp_1[i-1] + c_{1 \rightarrow 0}),$$

$$dp_1[i] = q_i^1 + \min(dp_1[i-1], dp_0[i-1] + c_{0 \rightarrow 1}).$$

Определяется конечное состояние:

$$s_n = \begin{cases} 0, & \text{если } dp_0[n] \leq dp_1[n] \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Используя обратное распространение, определяют состояния на каждом сегменте $i = (n-1, n-2, \dots, 1)$:

— если $s_{i+1} = 0$:

$$s_i = \begin{cases} 0, & \text{если } dp_0[i+1] - q_{i+1}^0 = dp_0[i] \\ 1, & \text{иначе} \end{cases},$$

если $s_{i+1} = 1$:

$$s_i = \begin{cases} 0, & \text{если } dp_0[n] \leq dp_1[n] \\ 1, & \text{иначе} \end{cases},$$

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{если } dp_1[i+1] - q_{i+1}^0 = dp_1[i] \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

На основе массива состояний определяются временные границы сегментов, на которых происходит переключение.

Описание эксперимента

В качестве объекта исследования использовался мобильный робот с возможностью реконфигурации колесной базы. Характеристики испытуемого робота представлены в таблице.

Таблица. Параметры испытуемого робота

Table. Parameters of the test robot

Параметр	Значение
Габариты робота (длина × ширина × высота), мм	240 × 290 × 120
Масса робота, кг	10
Радиус колеса, мм	56
Рабочее напряжение, В	12
Ширина колеса, мм	70,5
Масса колеса, кг	0,8
Максимальный радиус ролика, мм	14,5
Рабочее давление, МПа	0,6

Робот включает в себя пластиковый корпус, изготовленный из полилактида, одноплатный компьютер верхнего уровня, плату управления двигателями, контроллеры двигателей постоянного тока, рассчитанные на управление 12 В двигателями с рабочим током до 10 А. Пневматическая часть включает в себя стационарный компрессор с производительностью на выход не менее 30 л/мин, фильтр-регулятор со степенью очистки 40 мкм и блок электромагнитных клапанов, управляемых напряжением 12 В. Блок клапанов состоит из 8 электромагнитных соленоидов. В момент переключения однократно включаются четыре клапана на подачу воздуха, пневмокамеры расширяются, блокируя движение роликов. Для перехода в исходное состояние активируются оставшиеся четыре клапана, воздух стравливается в атмосферу и камеры сужаются, освобождая ролики. Эксперименты проводились в лабораторных условиях: бетонный и ровный пол, камеры робота и ролики для роликонесущих колес были изготовлены из термопластичного полиуретана. Аккумулятор для каждого эксперимента был полностью заряжен. Эксперимент проводился по замкнутой траектории (рис. 3). На траектории были определены точки переключения для реконфигурируемого робо-

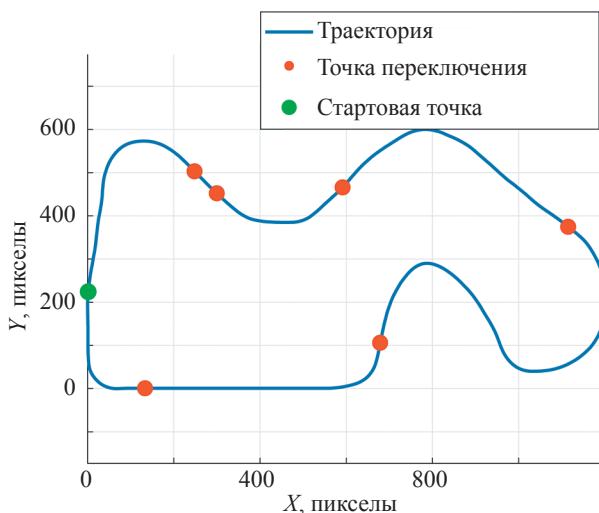


Рис. 3. Исходная траектория

Fig. 3. Initial trajectory

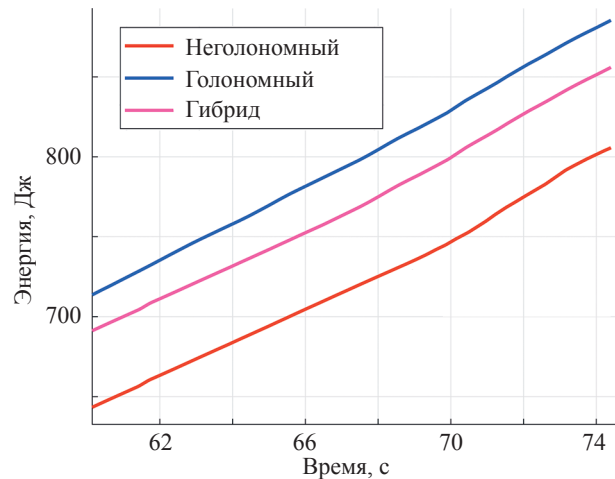


Рис. 4. Потребление энергии за одно прохождение по замкнутой траектории

Fig. 4. Energy consumption per one pass along the closed trajectory

та. Энергопотребление и ошибки отслеживания вдоль траектории измерялись для каждого типа мобильной платформы. Данные представлены на рис. 4 и 5. Для замкнутой траектории (рис. 4) неголономный робот израсходовал 805 Дж энергии, в то время как голономный — 885 Дж.

Для оценки качества отслеживания были зафиксированы ошибки позиционирования робота относительно заданной траектории по осям x и y , а также вычислена норма ошибки слежения (рис. 5).

Результаты расчета функционала Q с учетом точек переключения показаны на рис. 6. В конечный момент времени значение функционала Q для реконфигурируемого (гибрид) робота, переключающегося, согласно предложенному алгоритму, составило 998 условных единиц (усл. ед.), в то время как для неголономного и голономного роботов — 1009 и 1003 усл. ед. соответственно.

Обсуждение результатов

Результаты экспериментов соответствуют исходным предположениям. Реконфигурируемый робот демонстрирует более низкую энергоэффективность на прямых траекториях по сравнению с неголономным роботом. Полученная разница может быть обусловлена тем, что реконфигурируемые колеса не достигают идеально круглой формы, что приводит к неоптимальному использованию энергии. При этом, за счет алгоритма адаптивного переключения режима движения, реконфигурируемый робот способен экономить больше энергии по сравнению с голономным роботом. Предполагается, что в сценариях, более близких к реальным приложениям, мобильный реконфигурируемый робот может обеспечить более высокую энергоэффективность. Это ожидается из-за увеличения сил трения при элементарных движениях в неидеальных условиях, что, вероятно, приведет к более выраженным различиям в энергопотреблении.

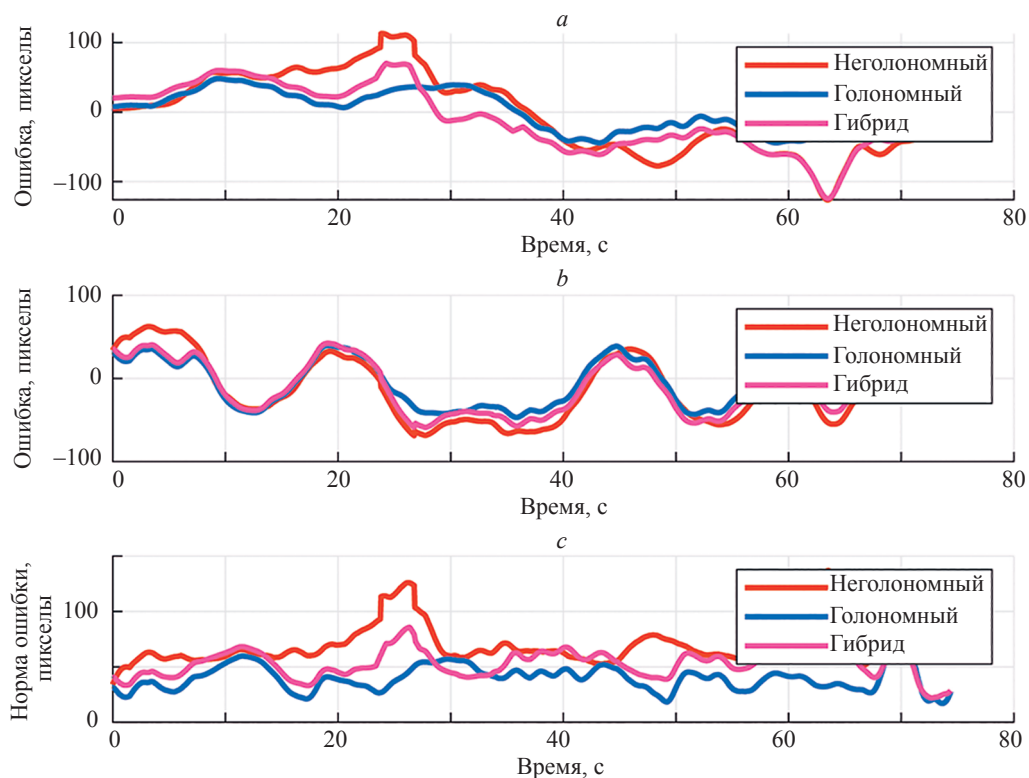


Рис. 5. Ошибки слежения: по осям x (а) и y (b); норма ошибки (с)
Fig. 5. Tracking errors: on the x -axis (a); on the y -axis (b); error norm (c)

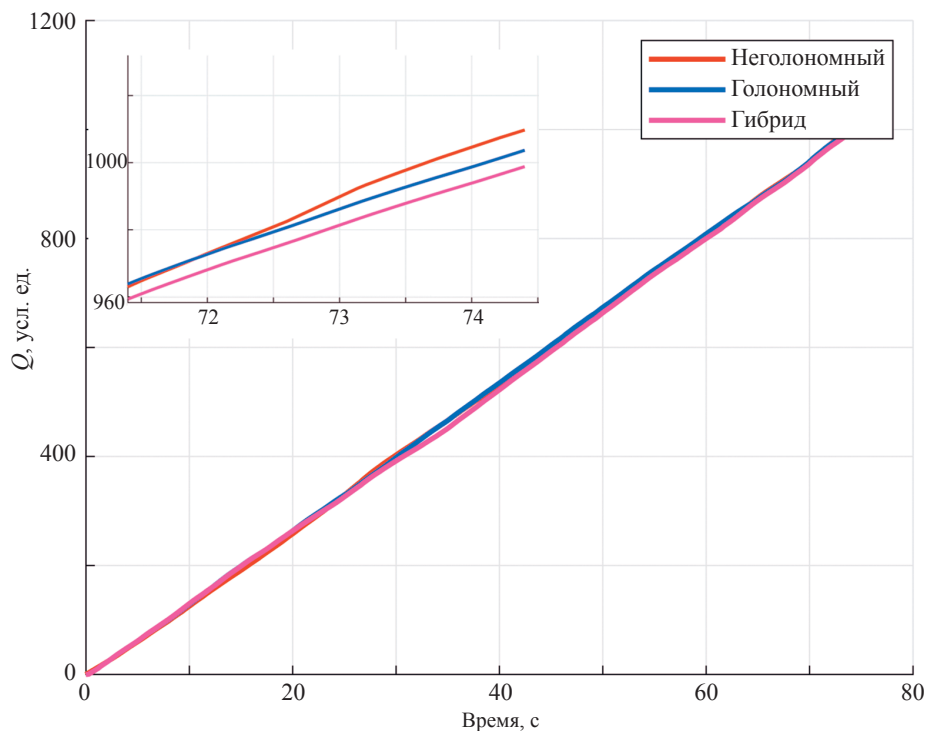


Рис. 6. График зависимости функционала Q от времени для всей траектории.

На вставке показан фрагмент кривых в диапазоне времени 71,5–74,5 с, демонстрирующий различие в значениях функционала между тремя типами роботов (неголономный, голономный и гибридный)

Fig. 6. Graph of the functional Q vs. time for the entire trajectory.

The inset shows a fragment of the curves in the time range 71.5–74.5 s, demonstrating the difference in functional values between three types of robots (nonholonomic, holonomic, and hybrid)

Также важно подчеркнуть адаптивные возможности платформы с двойным режимом передвижения. Например, в средах с присутствием людей или динамическими препятствиями платформа может отдавать приоритет маневренности для эффективной навигации. Напротив, в статичных средах, таких как пустые ангары или склады, платформа может использовать неголономный режим для быстрого и энергоэффективного передвижения. Эта динамическая адаптивность подчеркивает потенциальную полезность платформы в различных операционных контекстах.

Заключение

Представлен алгоритм квазиоптимального переключения режимов движения для реконфигурируемых роботов, который оптимизирует энергоэффективность при сохранении маневренности. Путем доработки кинематических, динамических и энергетических моделей был создан комплексный подход для анализа компромиссов

между мобильностью, эффективностью и точностью управления. Результаты экспериментов подтвердили, что предложенный подход снижает энергопотребление на 8 % на тестовой траектории. Однако в реальных сценариях, особенно для более крупных роботов, где масса платформы значительно превышает массу механизма реконфигурации, экономия энергии может достигать больших значений. Несмотря на относительно небольшую экономию энергии в идеальных условиях, система обеспечивает сохранение маневренности там, где это свойство критично для задач слежения за траекторией. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения гибридных стратегий передвижения для мобильных роботов, функционирующих в условиях ограниченных энергетических ресурсов. Будущие работы будут сосредоточены на дальнейшем совершенствовании стратегии переключения режимов, исследовании адаптивности в реальном времени и расширении экспериментальной валидации на более сложные сценарии и практические приложения.

Литература

1. Chen W., Wu P., Gong Y., Zhang Z., Wang K. The role of energy consumption in robotic mobile fulfillment systems: Performance evaluation and operating policies with dynamic priority // *Omega*. 2025. V. 130. P. 103168. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103168>
2. Kim T., Kang G., Lee D., Shim D.H. Development of an indoor delivery mobile robot for a multi-floor environment // *IEEE Access*. 2024. V. 12. P. 45202–45215. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3381489>
3. Kebede G., Gelaw A., Andualem H., Hailu A.T. Review of the characteristics of mobile robots for health care application // *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2024. V. 8. N. 2. P. 480–502. <https://doi.org/10.1007/s41315-024-00324-3>
4. Giurgiu T., Bărsan G., Virca I., Pupăză C. Mecanum wheeled platforms for special applications // *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*. 2022. V. 28. N. 3. P. 44–51. <https://doi.org/10.2478/kbo-2022-0086>
5. Zhewen Z., Hongliu Y., Chengjia W., Pu H., Jiangui W. A comprehensive study on mecanum wheel-based mobility and suspension solutions for intelligent nursing wheelchairs // *Scientific Reports*. 2024. V. 14. N. 1. P. 20644. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71459-3>
6. Qian J., Zi B., Wang D., Ma Y., Zhang D. The design and development of an omni-directional mobile robot oriented to an intelligent manufacturing system // *Sensors*. 2017. V. 17. N. 9. P. 2073. <https://doi.org/10.3390/s17092073>
7. Vestman R. A Comparative Study of Omnidirectional and Differential Drive Systems for Mobile Manipulator Robots: A Performance Review of Strengths and Weaknesses. Dissertation. 2023. 60 p.
8. Minh D.N., Do Quang H., Phuong N.D., Manh T.N., Bui D.N. An adaptive fuzzy dynamic surface control tracking algorithm for mecanum wheeled mobile robot // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2023. V. 12. N. 6. P. 354–361. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.12.6.354-361>
9. Yang X., Hu Y., Gao H., Ding K., Li Z., Zhu P., Sun Y., Liu C. Risk-aware non-myopic motion planner for large-scale robotic swarm using cvar constraints // *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2024. P. 5784–5790. <https://doi.org/10.1109/iros58592.2024.10802191>
10. Zhu K., Zhang T. Deep reinforcement learning based mobile robot navigation: a review // *Tsinghua Science and Technology*. 2021. V. 26. N. 5. P. 674–691. <https://doi.org/10.26599/tst.2021.9010012>
11. Zakharov D.N., Iaremenko A.M., Kurovskii D.M., Kurovskii A.M., Borisov O.I., Zhang B. Development of a mobile reconfigurable mecanum robot with a locking device of rollers // *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2024. P. 3553–3558. <https://doi.org/10.1109/iros58592.2024.10801549>

References

1. Chen W., Wu P., Gong Y., Zhang Z., Wang K. The role of energy consumption in robotic mobile fulfillment systems: Performance evaluation and operating policies with dynamic priority. *Omega*, 2025, vol. 130, pp. 103168. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103168>
2. Kim T., Kang G., Lee D., Shim D.H. Development of an indoor delivery mobile robot for a multi-floor environment. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 45202–45215. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3381489>
3. Kebede G., Gelaw A., Andualem H., Hailu A.T. Review of the characteristics of mobile robots for health care application. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 480–502. <https://doi.org/10.1007/s41315-024-00324-3>
4. Giurgiu T., Bărsan G., Virca I., Pupăză C. Mecanum wheeled platforms for special applications. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 44–51. <https://doi.org/10.2478/kbo-2022-0086>
5. Zhewen Z., Hongliu Y., Chengjia W., Pu H., Jiangui W. A comprehensive study on mecanum wheel-based mobility and suspension solutions for intelligent nursing wheelchairs. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 20644. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71459-3>
6. Qian J., Zi B., Wang D., Ma Y., Zhang D. The design and development of an omni-directional mobile robot oriented to an intelligent manufacturing system. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 9, pp. 2073. <https://doi.org/10.3390/s17092073>
7. Vestman R. A Comparative Study of Omnidirectional and Differential Drive Systems for Mobile Manipulator Robots: A Performance Review of Strengths and Weaknesses. Dissertation. 2023, 60 p.
8. Minh D.N., Do Quang H., Phuong N.D., Manh T.N., Bui D.N. An adaptive fuzzy dynamic surface control tracking algorithm for mecanum wheeled mobile robot. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2023, vol. 12, no. 6, pp. 354–361. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.12.6.354-361>
9. Yang X., Hu Y., Gao H., Ding K., Li Z., Zhu P., Sun Y., Liu C. Risk-aware non-myopic motion planner for large-scale robotic swarm using cvar constraints. *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2024, pp. 5784–5790. <https://doi.org/10.1109/iros58592.2024.10802191>
10. Zhu K., Zhang T. Deep reinforcement learning based mobile robot navigation: a review. *Tsinghua Science and Technology*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 674–691. <https://doi.org/10.26599/tst.2021.9010012>
11. Zakharov D.N., Iaremenko A.M., Kurovskii D.M., Kurovskii A.M., Borisov O.I., Zhang B. Development of a mobile reconfigurable mecanum robot with a locking device of rollers. *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*

12. Abd Mutalib M.A., Azlan N.Z. Prototype development of mecanum wheels mobile robot: a review // *Applied Research and Smart Technology (ARSTech)*. 2020. V. 1. N 2. P. 71–82. <https://doi.org/10.23917/arstech.v1i2.39>
13. Xie L., Herberger W., Xu W., Stol K.A. Experimental validation of energy consumption model for the four-wheeled omnidirectional mecanum robots for energy-optimal motion control // *Proc. of the IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*. 2016. P. 565–572. <https://doi.org/10.1109/amc.2016.7496410>
14. Zakharov D.N., Kurovskii D.M., Kurovskii A.M., Zhivitskii A.Y., Borisov O.I., Fakhro K., Pyrkin A.A. Experimental study of trajectory control algorithms under incomplete information on parameters and state variables of a nonlinear model of mobile robot motion // *Proc. of the 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. 2024. P. 1584–1588. <https://doi.org/10.1109/codit62066.2024.10708441>
- (IROS), 2024, pp. 3553–3558. <https://doi.org/10.1109/iros58592.2024.10801549>
12. Abd Mutalib M.A., Azlan N.Z. Prototype development of mecanum wheels mobile robot: a review. *Applied Research and Smart Technology (ARSTech)*, 2020, vol. 1, no. 2, pp. 71–82. <https://doi.org/10.23917/arstech.v1i2.39>
13. Xie L., Herberger W., Xu W., Stol K.A. Experimental validation of energy consumption model for the four-wheeled omnidirectional mecanum robots for energy-optimal motion control. *Proc. of the IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, 2016, pp. 565–572. <https://doi.org/10.1109/amc.2016.7496410>
14. Zakharov D.N., Kurovskii D.M., Kurovskii A.M., Zhivitskii A.Y., Borisov O.I., Fakhro K., Pyrkin A.A. Experimental study of trajectory control algorithms under incomplete information on parameters and state variables of a nonlinear model of mobile robot motion. *Proc. of the 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2024, pp. 1584–1588. <https://doi.org/10.1109/codit62066.2024.10708441>

Авторы

Захаров Дмитрий Николаевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9017-1505>, dnzakharov@itmo.ru

Панин Александр Дмитриевич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0005-0209-878X>, sashapanin220103@gmail.com

Яременко Андрей Михайлович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0007-7220-3957>, amyaremenko@itmo.ru

Алиев Дмитрий Романович — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-4057-965X>, dmitrii_aliev@itmo.ru

Дербин Максим Игоревич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0005-6451-0485>, matius_d@list.ru

Борисов Олег Игоревич — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2861-746X>, borisov@itmo.ru

Authors

Dmitry N. Zakharov — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9017-1505>, dnzakharov@itmo.ru

Alexandr D. Panin — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0005-0209-878X>, sashapanin220103@gmail.com

Andrey M. Iaremenko — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-7220-3957>, amyaremenko@itmo.ru

Dmitry R. Aliev — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-4057-965X>, dmitrii_aliev@itmo.ru

Maksim I. Derbin — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0005-6451-0485>, matius_d@list.ru

Oleg I. Borisov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2861-746X>, borisov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 13.08.2025

Одобрена после рецензирования 11.10.2025

Принята к печати 22.11.2025

Received 13.08.2025

Approved after reviewing 11.10.2025

Accepted 22.11.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»