

УДК 004.932.2:004.896

***АДАПТАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРАВИЛ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПЕРЕД ЗАЕЗДОМ НА НАКЛОННУЮ  
ПОВЕРХНОСТЬ***

***Кушнирский Я.А.***<sup>1</sup>

*Магистрант*

*Московский технический университет связи и информатики*

*Россия, Москва*

**Аннотация.** В статье рассматривается метод адаптации геометрических правил позиционирования мобильного робота перед заездом на наклонную поверхность. В качестве входных данных используются координаты четырех ключевых точек видимой области пандуса, получаемые по изображению фронтальной камеры. Предложена система правил, оценивающая полноту расположения пандуса в кадре, центрирование робота, перпендикулярность относительно плоскости въезда и допустимую дистанцию. Показано, что структура правил может сохраняться при изменении конфигурации робота, однако пороги и корректирующие действия должны настраиваться с учетом ширины шасси, расположения камеры и типа привода.

**Ключевые слова:** мобильный робот, компьютерное зрение, пандус, наклонная поверхность, геометрические правила, позиционирование, ключевые точки, тип привода.

***ADAPTATION OF GEOMETRIC POSITIONING RULES FOR A MOBILE  
ROBOT BEFORE ENTERING AN INCLINED SURFACE***

***Kushnirskiy Y.A.***

---

<sup>1</sup> Научный руководитель – к.т.н., доцент Верба В.А.

*Graduate Student*

*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

*Russia, Moscow*

**Abstract.** The article considers a method for adapting geometric positioning rules for a mobile robot before entering an inclined surface. The input data are the coordinates of four key points of the visible ramp area obtained from a frontal camera image. A rule-based system is proposed to evaluate whether the ramp is fully visible in the frame, whether the robot is centered, whether it is perpendicular to the entrance plane, and whether the distance to the ramp is within the acceptable range. It is shown that the rule structure can remain unchanged for different robot configurations, while thresholds and corrective actions should be adjusted according to chassis width, camera position, and drive type.

**Keywords:** mobile robot, computer vision, ramp, inclined surface, geometric rules, positioning, keypoints, drive type.

### **Введение**

Мобильный робот при заезде на наклонную поверхность должен не только обнаружить пандус, но и занять положение, при котором дальнейшее движение не приведет к боковому смещению, касанию кромок или потере устойчивости. Поэтому задача преодоления пандуса включает два уровня: визуальное получение параметров наклонной области и геометрическую проверку готовности робота к заезду. В исследованиях проходимости подчеркивается, что решение о движении зависит не только от свободного пространства, но и от формы поверхности, уклона и положения робота относительно участка движения [1,2]. В обзорах риск-ориентированной навигации такие факторы рассматриваются как элементы оценки проходимости и безопасности траектории [11].

Сходная логика используется в задачах визуального управления, где изображение камеры служит не самостоятельным результатом, а входом для последующего позиционирования объекта управления [3,4]. Для мобильных роботов это особенно важно, поскольку одна и та же видимая область может требовать разных управляющих действий в зависимости от кинематической схемы платформы, ширины шасси и высоты установки камеры [5,6]. Для адаптации правил под платформу важен и эмпирический след движения: современные подходы используют данные о фактически пройденных участках, чтобы учитывать особенности конкретного робота [12].

### **Цель и задачи исследования**

Цель статьи состоит в разработке метода адаптации геометрических правил позиционирования мобильного робота перед заездом на наклонную поверхность. Для достижения цели формализуются признаки пандуса в кадре, вводится система правил готовности к заезду и рассматривается настройка этих правил под разные конфигурации мобильной платформы.

Для достижения цели решаются задачи: формализовать признаки пандуса по четырем ключевым точкам; задать правила готовности к заезду; определить корректирующие действия при нарушении правил; показать настройку порогов и действий под разные типы привода.

### **Основная часть**

Входом рассматриваемого метода являются четыре ключевые точки видимой области пандуса:

$$P = \{BL, BR, TL, TR\}$$

где  $BL$  и  $BR$  – левая и правая нижние точки въезда;  $TL$  и  $TR$  – левая и правая верхние точки видимой наклонной области.

Предполагается, что координаты точек заданы в нормализованной плоскости изображения  $[0; 1]$ . Такая форма удобна тем, что правила позиционирования не зависят напрямую от разрешения кадра. Сами точки могут

быть получены нейросетевым модулем компьютерного зрения; для таких задач применимы вычислительно компактные архитектуры, включая MobileNetV2, а также стандартные процедуры разметки и обучения моделей по изображениям [7–10].

Основными признаками, используемыми для позиционирования, являются центр нижней границы въезда, видимая ширина пандуса и симметрия боковых границ. Центр нижней границы определяется по формуле (1):

$$x_c = \frac{x_{BL} + x_{BR}}{2} \quad (1)$$

где  $x_{BL}$ ,  $x_{BR}$  – нормализованные горизонтальные координаты нижних точек пандуса.

Ошибка центрирования относительно середины кадра вычисляется по формуле (2):

$$e_c = x_c - 0,5 \quad (2)$$

Видимая ширина нижней границы пандуса задается выражением (3):

$$w_b = x_{BR} - x_{BL} \quad (3)$$

Для оценки разворота робота относительно плоскости въезда используются углы боковых границ – формулы (4), (5):

$$\alpha_L = \arctan \frac{y_{TL} - y_{BL}}{x_{TL} - x_{BL}} \quad (4)$$

$$\alpha_R = \arctan \frac{y_{TR} - y_{BR}}{x_{TR} - x_{BR}} \quad (5)$$

где  $\alpha_L$  и  $\alpha_R$  характеризуют наклон левой и правой боковых границ трапеции в плоскости изображения. Если робот расположен близко к оси въезда, боковые границы пандуса в кадре имеют сопоставимую перспективную форму. Поэтому ошибку симметрии можно задать формулой (6):

$$e_s = ||\alpha_L| - |\alpha_R|| \quad (6)$$

Геометрические признаки пандуса в кадре представлены на рисунке 1.

Такая параметризация не восстанавливает полную трехмерную геометрию сцены, но дает достаточный набор признаков для предварительной проверки

положения робота: смещения относительно оси въезда, ориентации корпуса и расстояния до нижней границы пандуса.

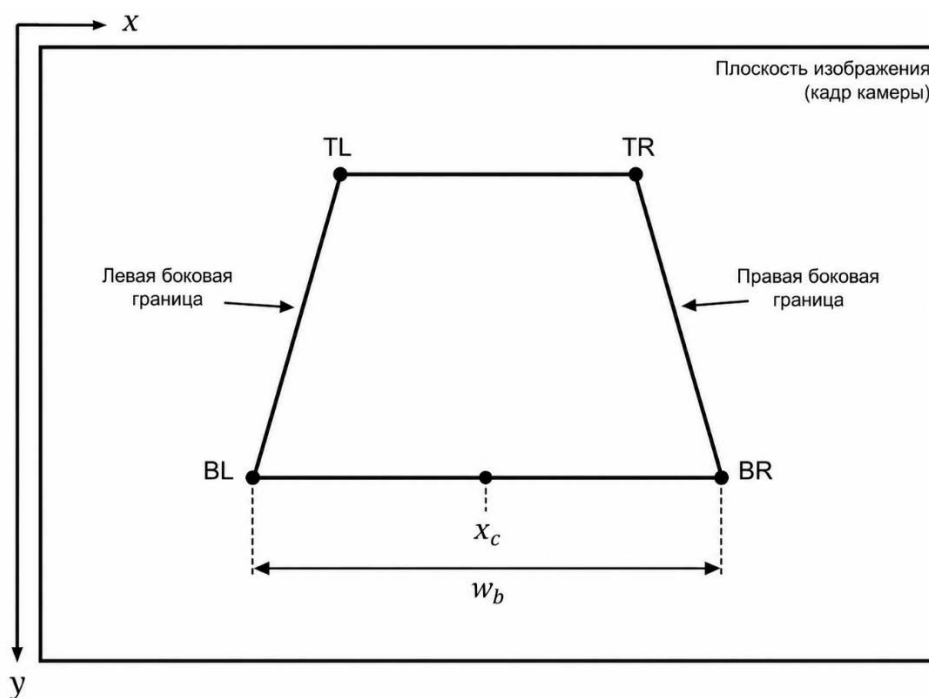


Рисунок 1. Геометрические признаки пандуса в кадре

Примечание – разработано автором.

Позиционирование перед пандусом рассматривается как проверка набора логических условий. Каждое условие связано с отдельным геометрическим признаком, а совокупное разрешение на заезд формируется только при выполнении всех правил – формула (7):

$$C = C_1 \wedge C_2 \wedge C_3 \wedge C_4 \quad (7)$$

где  $C_1$  – пандус полностью расположен в кадре;  $C_2$  – робот центрирован относительно нижней границы въезда;  $C_3$  – робот ориентирован близко к перпендикуляру относительно плоскости въезда;  $C_4$  – расстояние до пандуса находится в допустимом диапазоне. Нарушение любого из условий блокирует разрешение на заезд и переводит алгоритм в режим коррекции.

Первое правило проверяет корректность видимой области. Если хотя бы одна ключевая точка выходит за допустимую область кадра, дальнейшие

вычисления могут давать неверную оценку. Формально это условие можно задать через допустимый отступ  $\delta$  – формула (8):

$$C_1: \delta \leq x_i \leq 1 - \delta, \delta \leq y_i \leq 1 - \delta, i \in \{BL, BR, TL, TR\} \quad (8)$$

Второе правило связано с центрированием робота и определяется по формуле (9):

$$C_2: |e_c| \leq \varepsilon_c \quad (9)$$

где  $\varepsilon_c$  – допустимое смещение центра нижней границы пандуса относительно центра кадра.

Третье правило оценивает разворот робота и определяется по формуле (10):

$$C_3: e_s \leq \varepsilon_s \quad (10)$$

где  $\varepsilon_s$  – допустимая ошибка симметрии боковых границ.

Четвертое правило связано с дистанцией до пандуса. В монокулярной постановке расстояние не измеряется напрямую, но может быть косвенно оценено через видимую ширину нижней границы – формула (11):

$$C_4: w_{\min} \leq w_b \leq w_{\max} \quad (11)$$

где  $w_{\min}$  и  $w_{\max}$  – нижний и верхний пороги допустимой видимой ширины пандуса. Если  $w_b$  слишком мало, робот находится далеко; если  $w_b$  слишком велико, робот может быть чрезмерно близко к въезду. Пороги  $w_{\min}$  и  $w_{\max}$  определяются калибровочно и зависят от высоты установки камеры, ее угла наклона и геометрии пандуса.

Смысл правил и соответствующие корректирующие действия приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические правила позиционирования перед заездом на пандус

Правило	Проверяемый признак	Нарушение	Корректирующее действие
$C_1$	Все ключевые точки находятся внутри допустимой области кадра	Пандус частично вышел из кадра	Отъезд назад или повторное наведение

$C_2$	Центр нижней границы близок к центру кадра	Робот смещен относительно оси въезда	Боковое смещение или поворот с последующим подъездом
$C_3$	Боковые границы трапеции близки к симметрии	Робот развернут относительно пандуса	Поворот на месте или дуговой маневр
$C_4$	Видимая ширина нижней границы находится в допустимом диапазоне	Робот слишком далеко или слишком близко	Движение вперед или назад

Алгоритмически цикл позиционирования строится как повторяющаяся проверка правил. Если условия  $C_1 - C_4$  выполнены, робот получает разрешение на заезд. Если хотя бы одно условие нарушено, выбирается корректирующее действие, после чего признаки вычисляются повторно. Цикл представлен на рисунке 2.

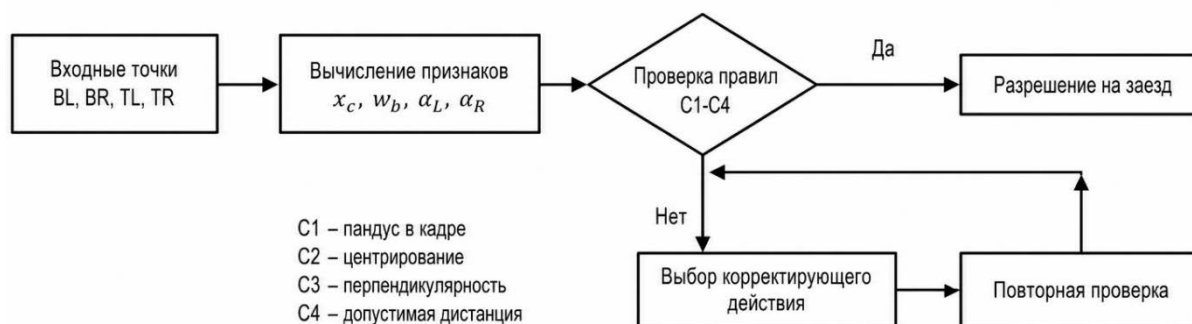


Рисунок 2. Цикл позиционирования робота перед заездом на пандус

Примечание – разработано автором.

Данный подход не заменяет низкоуровневый контур управления движением. Его задача уже: сформировать проверяемое условие готовности к заезду и определить тип коррекции, которую должен выполнить конкретный робот.

## Результаты

Структура правил  $C_1 - C_4$  может сохраняться для разных платформ, однако численные пороги и корректирующие действия должны зависеть от конфигурации робота. Это связано с тем, что одинаковая ошибка в кадре не всегда означает одинаковый маневр в физическом пространстве. Например, платформа с механум-колесами может компенсировать боковое смещение

Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

прямым поперечным движением, тогда как дифференциальная платформа вынуждена выполнять серию поворотов и коротких перемещений вперед.

Основными параметрами адаптации являются ширина шасси  $B$ , допустимый боковой запас  $m$ , высота установки камеры  $h_c$ , ее угол наклона  $\theta_c$ , а также минимальный радиус поворота  $R_{\min}$ . Эти параметры влияют на пороги  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_s$ ,  $w_{\min}$  и  $w_{\max}$ . В общем виде набор настроек можно представить как:

$$\Theta = \{\varepsilon_c, \varepsilon_s, w_{\min}, w_{\max}, \delta\}$$

где  $\Theta$  – вектор параметров правил позиционирования.

Для более широкой платформы допустимое смещение должно быть меньше, поскольку боковой запас при заезде снижается. Для робота с камерой, установленной выше или под другим углом, меняется видимая ширина пандуса при той же фактической дистанции. Для платформы с большим радиусом поворота требуется более раннее выравнивание относительно оси въезда, так как резкая коррекция перед самым пандусом может быть кинематически невозможна.

Адаптация корректирующих действий под тип привода приведена в таблице 2.

Таблица 2. Адаптация корректирующих действий под тип привода

Конфигурация робота	Возможность бокового смещения	Коррекция центрирования	Коррекция разворота
Дифференциальный привод	Нет	Поворот, короткое движение вперед, повторная проверка	Поворот на месте
Четырехколесный бортовой привод	Ограничена	Поворот с малым радиусом и повторное выравнивание	Поворот за счет разности скоростей бортов
Механум- или омни-платформа	Да	Непосредственное боковое смещение	Поворот на месте или комбинированное смещение
Ackermann-платформа	Нет	Маневр по дуге с учетом минимального радиуса	Дуговая траектория без поворота на месте

Таблица 2 показывает, что универсальность метода заключается не в одинаковых командах управления, а в единой логике проверки положения.

Геометрические признаки остаются общими, но их интерпретация зависит от кинематических ограничений платформы. Поэтому метод целесообразно рассматривать как надстройку над визуальным модулем и низкоуровневым управлением: он не задает конкретные скорости колес, а определяет, какое условие нарушено и какой тип коррекции требуется.

Практическое ограничение метода связано с монокулярной постановкой. Видимая ширина  $w_b$  используется как косвенный признак дистанции, поэтому пороги  $w_{\min}$  и  $w_{\max}$  должны калиброваться для конкретной камеры и геометрии пандуса. Дополнительным ограничением является чувствительность к качеству предсказания ключевых точек: ошибка в координатах  $BL$  и  $BR$  напрямую влияет на оценку  $x_c$  и  $w_b$ , а ошибка в точках  $TL$  и  $TR$  – на оценку симметрии боковых границ. В рассматриваемых условиях это не отменяет применимости правил, но требует повторной проверки после каждого корректирующего действия.

### **Заключение**

Предложен метод адаптации геометрических правил позиционирования мобильного робота перед заездом на наклонную поверхность. Метод использует четыре ключевые точки видимой области пандуса и формирует признаки центрирования, видимой ширины и симметрии боковых границ. На основе этих признаков задана система правил  $C_1 - C_4$ , определяющая готовность робота к заезду и необходимость корректирующего действия. Показано, что структура правил может сохраняться для разных мобильных платформ, однако пороги и способы коррекции должны настраиваться с учетом ширины шасси, расположения камеры и типа привода. Дальнейшее развитие метода связано с экспериментальной проверкой порогов на реальных конфигурациях робота и оценкой устойчивости правил при изменении освещения, покрытия пандуса и точности определения ключевых точек.

**Библиографический список**

1. Sevastopoulos C., Konstantopoulos S. A Survey of Traversability Estimation for Mobile Robots : arXiv:2204.10883. – 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2204.10883.
2. Lim H., Oh M., Lee S., Ahn S., Myung H. Similar but Different: A Survey of Ground Segmentation and Traversability Estimation for Terrestrial Robots : arXiv:2312.16839. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2312.16839.
3. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L.-C. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 4510–4520.
4. Chaumette F., Hutchinson S. Visual Servo Control. Part I: Basic Approaches // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2006. – Vol. 13, № 4. – P. 82–90.
5. Chaumette F., Hutchinson S. Visual Servo Control. Part II: Advanced Approaches // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2007. – Vol. 14, № 1. – P. 109–118.
6. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. – 2nd ed. – Cambridge, MA : MIT Press, 2011. – ISBN 978-0-262-01535-6.
7. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. – 2nd ed. – Cham : Springer, 2016. – ISBN 978-3-319-32552-1.
8. Kim T., Lim S., Shin G., Sim G., Yun D. An Open-Source Low-Cost Mobile Robot System With an RGB-D Camera and Efficient Real-Time Navigation Algorithm // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 127871–127881. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3226784.
9. Russell B. C., Torralba A., Murphy K. P., Freeman W. T. LabelMe: A Database and Web-Based Tool for Image Annotation // International Journal of Computer Vision. – 2008. – Vol. 77. – P. 157–173. – DOI: 10.1007/s11263-007-0090-8.

10. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization : arXiv:1412.6980. – 2014. – DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.
11. Benrabah M., Orou Mousse C., Randriamiarintsoa E., Chapuis R., Aufrère R. A Review on Traversability Risk Assessments for Autonomous Ground Vehicles: Methods and Metrics // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 6. – Article 1909. – DOI: 10.3390/s24061909.
12. Jeon Y., Son E. I., Seo S.-W. Follow the Footprints: Self-supervised Traversability Estimation for Off-road Vehicle Navigation based on Geometric and Visual Cues // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2024. – arXiv:2402.15363. – DOI: 10.48550/arXiv.2402.15363.