

## МЕТОДЫ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

К. Ю. Дергачев, Л. А. Краснов, А. Н. Радомский  
Национальный аэрокосмический университет – «ХАИ»

**Аннотация.** Приведен анализ существующих алгоритмов локальной навигации, проведено исследование возможности применения существующих алгоритмов локальной навигации для мобильных роботов с системой технического зрения. Предложен комплексный алгоритм локальной навигации, позволяющий решать задачи локальной навигации в условиях неполной информированности о внешней среде.

**Ключевые слова:** локальная навигация, мобильный робот, латерация, визуальная одометрия, определение местоположения.

### Введение

В настоящее время актуальной является задача локального позиционирования транспортных роботов (ТР). Информация о точном местоположении транспортного робота может значительно расширить число возможных применений, а так же поднять задачи автономного пилотирования на более высокий уровень [1,3]. Обычно местоположение ТР определяется как в глобальных, так и в локальных координатах.

Сегодня для решения задач позиционирования широко используются системы спутниковых навигационных систем (СНС) GPS и ГЛОНАСС. Основными преимуществами СНС глобальный охват и достаточная точность определения местоположения вне помещений при использовании дифференциального режима позиционирования. В качестве основных недостатков СНС целесообразно выделить зависимость от погодных условий и принципиальную невозможность использования в помещениях, крытых складах, подземных паркингах, в туннелях, под мостами, в дорожных развязках, что существенно ограничивает область их применения для решения задач локальной навигации. Еще одним недостатком не позволяющим использовать СНС для локальной навигации является недостаточная точность решения задач позиционирования в обычном режиме функционирования СНС.

Названные недостатки способны исправить системы локального позиционирования (LPS - Local Positioning Systems), основным предназначением которых является быстрое позиционирование для решения задач навигации на складах, обеспечения автоматической парковки ТС, под-

держки действий пилота в закрытых паркингах, при пилотировании в сложной помеховой обстановке. Необходимо отметить, что применение ультразвуковых сонаров в составе таких систем обладает не достаточной точностью, ограничено по дальности использования, и не позволяет идентифицировать препятствие, а только определить расстояние до помехи движения.

Целью статьи является обзор существующих алгоритмов определения местоположения, которые могут быть применены в системах LPS с использованием систем технического зрения, а так же формирование комплексного алгоритма, позволяющего решать навигационные задачи в условиях неполной информированности о внешней среде.

### 1. Модель пространства и критерии сравнения алгоритмов

Рассмотрим модель пространства, в которой совершает движение ТР, оснащенное средством технического зрения – панорамной видеокамерой (рис.1). В пространстве находится множество ориентиров  $\{A_1(x_1, y_1), A_2(x_2, y_2), \dots, A_N(x_N, y_N)\}$ .

Для решения задачи локального позиционирования необходимо определить координаты  $A_0(x_0, y_0)$  размещения видеокамеры на мобильном роботе. Расстояния от видеокамеры до ориентира обозначены, как  $P_1, P_2, \dots, P_N$  и могут быть определены при помощи  $A_1(x_1, y_1)$  специальных геометрических методов.

Позиционирование осуществляется с помощью алгоритма определения координат ТС в помещении на основе данных о расстоянии до определенных ориентиров.

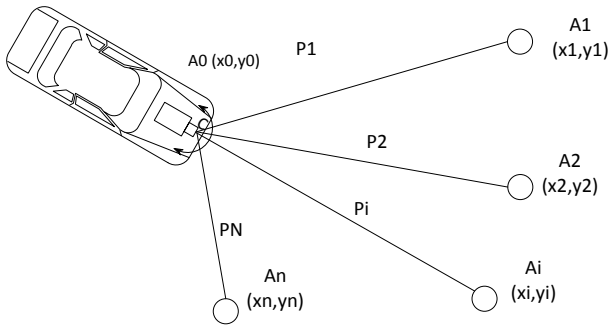


Рис. 1. Модель пространства

В качестве методов определения расстояния до объекта могут быть использованы следующие:

В случае известных размеров ориентира может быть использована одна видеокамера и значения  $P_1, P_2, \dots, P_N$ , определяются из геометрических пропорций после выделения ориентира в кадре и определения его геометрических размеров. В этом случае в качестве ориентиров могут выступать дорожные знаки, светофоры, шлагбаумы, элементы дорожной разметки, специальные искусственные ориентиры, т.е. ориентиры в априоре-известными геометрическими размерами.

В случае, когда геометрические размеры объекта неизвестны для определения расстояний до ориентира необходимо создание стереопары и выделения одних и тех же фрагментов изображения на различных кадрах, и определения расстояния до них из геометрических соотношений. Причем стереопара может быть создана как путем использования нескольких видеокамер, установленных на транспортном средстве в определенных конструктивных точках на некотором расстоянии  $b$  друг от друга, так и быть синтезированной. Существуют два метода синтеза стереопары: организация механического фиксированного перемещения видеокамеры, вдоль одной из координатных осей, и второй мнимый, как при известных параметрах движения ТР, берутся в обработку кадры с одной камеры с некоторой временной задержкой. Зная координаты размещения камеры, за счет обработки параметров движения ТР, из геометрических соображений определяются расстояния до выделенных ориентиров [2].

Применение стереопары позволяет определить координаты двух (или более) характерных точек ТС, что позволяет определить не только положение центра масс ТР, но и положение его строительной оси, по которой можно восстановить положение габаритных точек ТР, используя математический аппарат аналитической. Зная

мгновенный угол поворота управляемых колес, транспортного средства и его кинематическую схему можно определить мгновенный центры поворота и определить параметры криволинейного движения ТР [2].

В качестве критериев сравнения алгоритмов используются:

- тип алгоритма позиционирования (базовый или улучшающий);
- независимость от предварительных измерений;
- погрешность работы алгоритма, вычислительная сложность.

## 2. Обзор алгоритмов позиционирования

Каждая рукопись состоит из следующих структурных элементов:

В алгоритме Proximity (Ближайший ориентир) координаты ТС определяются, как координаты ориентира, который наиболее близок к ТР. Этот алгоритм можно считать наиболее простым. К преимуществам данного алгоритма можно отнести простоту реализации ввиду низкой вычислительной сложности ( $O(N)$ ) и необходимости знаний только о месторасположении ориентиров. Явным недостатком является очень низкая точность. Данный алгоритм может быть приемлемым для решения определенного класса задач, не требующих высокой точности (например, определения необходимого цифрового картографического материала или отображения местоположения ТР на цифровой карте или модели местности) или как первый этап комплексного алгоритма локальной навигации. Данный алгоритм можно отнести к базовым, не требующим предварительных измерений.

Алгоритм Centroid основан на вычислении геометрического центра плоской фигуры, образованной несколькими визуальными ориентирами. Местоположение ТС вычисляется с использованием соотношений:

$$X_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i; Y_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i.$$

Этот алгоритм является достаточно простым с вычислительной точки зрения (сложность  $O(N)$ ). Преимущества алгоритма – простота реализации и необходимость знания только месторасположения визуальных ориентиров. Явным недостатком является низкая точность. Данный алгоритм может быть приемлемым для решения определенного класса задач (например, определение в какой склада или паркинга находится ТС) или может быть применим в качестве начального приближения для работы другого алгоритма. Алгоритм можно характеризовать как

базовый и не требующий предварительных измерений.

Алгоритм Weighted centroid является улучшенной версией алгоритма Centroid в результате учета величины расстояний до визуальных ориентиров. В этом случае координаты ТС определяются при помощи соотношений

$$X_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i X_i; Y_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i Y_i;$$

$$\mu_i = \left( P_i^2 \sum_{j=1}^N \frac{1}{P_j^2} \right)^{-1},$$

где  $\mu_i$  - весовой коэффициент.

Преимущество алгоритма простота реализации и необходимость знания только месторасположения визуальных ориентиров. К недостаткам можно отнести зависимость от числа визуальных ориентиров. Чем больше ориентиров, тем выше будет точность определения координат ТС. Данный алгоритм демонстрирует более высокую точность по сравнению с описанными выше. Алгоритм можно отнести к базовым, не требующим предварительных измерений. Этот алгоритм является достаточно простым с вычислительной точки зрения (сложность  $O(N)$ ).

Алгоритм Lateration представляет собой геометрический подход к решению задачи локальной навигации. Он основан на вычислении расстояний между точкой, в которой находится ТС и минимум тремя визуальными ориентирами с дальнейшим решением системы из  $N$  нелинейных уравнений.

Круговая латерация основана на расстоянии между искомой точкой и визуальными ориентирами. Для вычисления координат агента, необходимо решить систему из уравнений вида:

$$P_i^2 = (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2,$$

где  $i = 3 \dots N$ .

Гиперболическая латерация основана на разнице расстояний между ТС и визуальными ориентирами. Для определения местоположения ТС, решить систему из уравнений вида:

$$d_{ij}^2 = r_i^2 - r_j^2$$

$$d_{ij}^2 = \left( (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 - (X_j - X_0)^2 + (Y_j - Y_0)^2 \right),$$

где  $i, j = 3 \dots N$ .

Достоинство алгоритма – высокая точность. Данный алгоритм является одним из базовых, нашел применение в GPS и сотовых сетях.

Алгоритм визуальной одометрии основан на выделении одних и тех же областей на разных кадрах изображения, которые могут быть получены, как с одной видеокамеры, так и при помощи стереопары.

При этом вычислительная процедура может быть проиллюстрирована алгоритмом на рис.2.

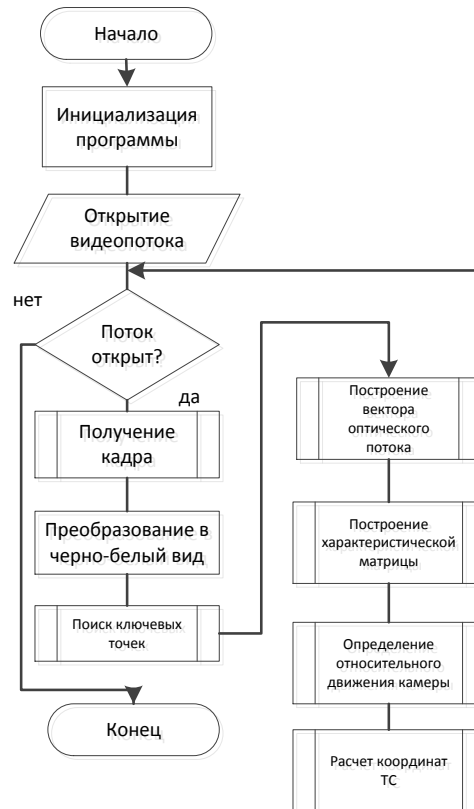


Рис.2. Алгоритм визуальной одометрии

По перемещению и трансформации видеообластей кадра судят о перемещении видеокамеры, а, следовательно, и ТС, а так же приближении препятствий, которые в кадре перемещаются с большей скоростью. Последовательность действий при этом может быть следующей:

- построение разницы накапливаемых изображений;
- непосредственное вычисление оптического потока;
- оценка параметров движения на основе оценки накопленного оптического потока.

Таким образом, анализ алгоритмов локального позиционирования, показал их разнообразность, отличия по точности определения координат, а так же характерные черты, которые позволят эффективно решать задачи, не только позиционирования, но определения положения строительной оси ТС и его угловой ориентации в пространстве, что позволит эффективно решать

задачи парковки и движения в среде с препятствиями.

### 3. Комплексный алгоритмы локальной навигации

Идея последовательного использования описанных алгоритмов локальной навигации основывается на идеи поэтапной работы системы, аналогичной принципу «Boots records» для диалоговой операционной системы и представлена на рис.3.

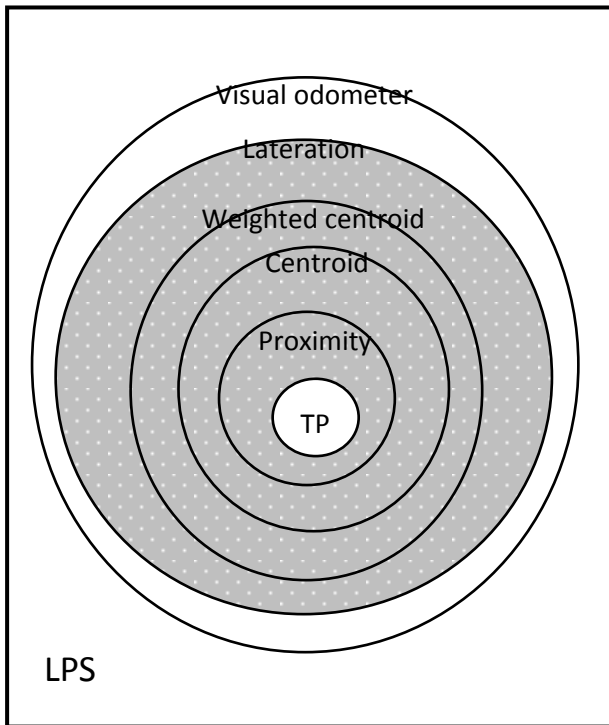


Рис. 3 – Формирование комплексного алгоритма локальной навигации

Схема, представленная на рис.3 несет следующий смысл: на начальном этапе локальной навигации решается задача выделения визуального ориентирования выполняется алгоритм Proximity, затем с появлением информации о найденных визуальных ориентирах происходит запуск алгоритма Centroid, Weighted centroid. При организации распознавания трех и более визуальных ориентиров и формирования (синтезирования) стереопары происходит запуск алгоритма Lateration. Относительно, определенных координат ( $X_0, Y_0$ ), происходит запуск алгоритма визуальной одометрии, который представлен на рис.2

### 4. Экспериментальная отработка алгоритма латерации

В работе проводились исследования функционирования алгоритма локальной навигации

Lateration. С этой целью был построен колесный робот на платформе Robergy Pi 2, оснащенный видеочкамерой в качестве средства технического зрения. Внешний вид разработанного робота представлен на рис.4.

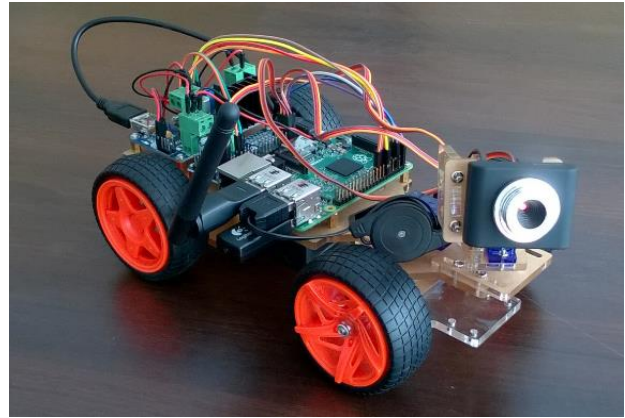


Рис. 4 – Разработанный транспортный робот

Схема эксперимента заключалась в помещении робота в среду с известными визуальными ориентирами, после чего робот проводил распознавание визуальных ориентиров с помощью алгоритма каскадов Хара, после этого рассчитывал состояние до каждого ориентира и формировал модель пространства. Затем проводилось выполнение алгоритма латерации с целью определения координат. Программное обеспечение робота реализовано с использованием языка программирования Python. В качестве средства отображения информации в работе использован экран. Для проведения достоверности результатов проводилось измерение расстояние до визуальных ориентиров при помощи обычных средств измерения, а затем расчет координат месторасположения камеры робота.

В результате проведения экспериментального исследования получены следующие результаты точность определения расстояния до ориентиров составило 8 %, что обусловлено точностью определения фокусного расстояния камеры.

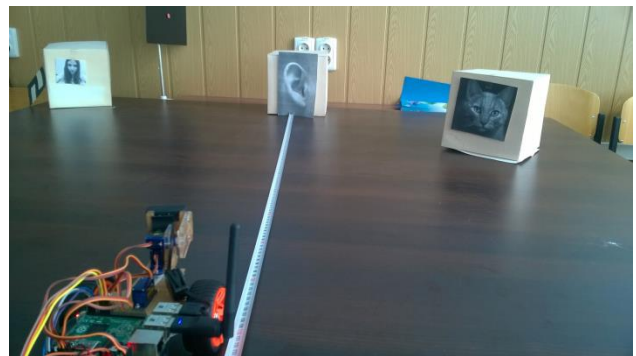


Рис. 5 – Схема проведения эксперимента

Точность определения координат камеры мобильного робота составила 6,5%, что является приемлемым для условий проведения эксперимента.

### Заключення

В работе выполнен анализ существующих алгоритмов и предложен новый подход в виде комплексного алгоритма, который может быть использован для локальной навигации как мобильных роботов так и транспортных средствах, оснащенных системами технического зрения. Направлением дальнейшего исследования является экспериментальная отработка комплексных алгоритмов с целью повышения точности навигационных определений.

### Список использованной литературы

1. Kulik, A., Dergachev, K., Kharina, N: Development of technical solution for realization of intelligent transport systems [Text] – Transport Problems, 2013, volume 8, issue 1.

2. Kulik, A., Dergachov, K., Radomskyi, O. Binocular technical vision for wheeled robot controlling [Text] //Transport Problems. – 2015. – Т. 10. – №. 1. – С. 55–62.

3. Śladkowski, A., Pamuła, W. (ed.). Intelligent Transportation Systems—Problems and Perspectives [Text]. – Springer, 2015. – Т. 32

### References

1. Kulik, A., Dergachev, K., Kharina, N. (2013): Development of technical solution for realization of intelligent transport systems – Transport Problems, Katowice, Poland, Vol. 8, issue 1, pp. 27–33.

2. Kulik, A., Dergachov, K., Radomskyi, O. (2015) Binocular technical vision for wheeled robot controlling //Transport Problems, Poland, Vol. 10, №. 1, pp. 55–62.

3. Śladkowski, A., Pamuła, W. (ed.). (2015) Intelligent Transportation Systems—Problems and Perspectives. Springer, Germany. Vol. 32.

## METHODS OF LOCAL NAVIGATION OF MOBILE ROBOTS BASED ON OF TECHNICAL VISION

**K. Yu. Dergachov, L.O.Krasnov, O.M.Radomsky**

*National Aerospace University – «Kharkov Aviation Institute»*

**Abstract.** *The analysis of existing algorithms of local navigation is given, the possibility of applying the existing algorithms of local navigation for mobile robots with the system of technical vision is investigated. A complex algorithm of local navigation is proposed that allows solving the problems of local navigation in conditions of incomplete awareness of the external environment.*

*In the work, the functioning of the localization navigation algorithm, Luration, was carried out. For this purpose, a wheeled robot was built on the platform Raberry Pi 2, equipped with a video camera as a means of technical vision. Appearance of the developed robot is shown in Fig.4. The scheme of the experiment consisted in placing the robot in a medium with known visual reference points, after which the robot carried out recognition of visual landmarks using the algorithm of Hahr's cascades, then calculated the state to each landmark and formed a model of space. Then, a lateration algorithm was performed to determine the coordinates. The robot software is implemented using the Python programming language. As a means of displaying information in the work, a screen is used. To carry out the reliability of the results, the distance to the visual reference points was measured using conventional means of measurement, and then the location of the robot camera was calculated.*

*As a result of the experimental study, the following results were obtained, the accuracy of determining the distance to the landmarks was 8%, which is due to the accuracy of determining the camera's focal length. The accuracy of determining the coordinates of the camera of the mobile robot was 6.5%, which is acceptable for the conditions of the experiment.*

**Key words:** *Local navigation, mobile robot, lateration, visual odometry, Positioning.*

## МЕТОДИ ЛОКАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ НА ОСНОВІ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

**К. Ю. Дергачов, Л. О. Краснов, А.М. Радомський**

*Національний аерокосмічний університет – «ХАІ»*



**Анотація.** Запропоновано аналіз існуючих алгоритмів локальної навігації, проведено дослідження можливості використання існуючих алгоритмів локальної навігації для мобільних роботів з системою технічного зору. Запропоновано комплексний алгоритм локальної навігації, що дозволяє розв'язувати задачі локальної навігації в умовах неповної інформованості о зовнішнім середовищі.

**Ключові слова:** локальний мобільний робот, локальна навігація, латерація, візуальна одометрія, визначення місцеположення.

Получено 18.04.2017



**Дергачев Константин Юрьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры Систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета – «Харьковский авиационный институт». Ул.Чкалова, 17, Харьков, Украина, E-mail: kdergachev@ukr.net, тел. +38-057-788-45-49

**Kostiantyn Dergachov**, Dr. of PhD, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Aircraft Control Systems of the National Aerospace University – «Kharkov Aviation Institute». Chkalova st., 17, Kharkiv, Ukraine.

**ORCID ID: 0000-0002-6939-3100**



**Краснов Леонид Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета – «Харьковский авиационный институт». Ул.Чкалова, 17, Харьков, Украина, E-mail: b-medved@yandex.ru, тел. +38-057-788-45-49

**Krasnov Leonid**, Dr. of PhD, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Aircraft Control Systems of the National Aerospace University – «Kharkov Aviation Institute». Chkalova st., 17, Kharkiv, Ukraine.

**ORCID ID: 0000-0003-2607-8423**



**Радомский Александр Николаевич**, ассистент кафедры Систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета – «Харьковский авиационный институт». Ул.Чкалова, 17, Харьков, Украина, E-mail: 4215050@gmail.com, тел. +38-057-788-45-49

**Radomsky Olexander**, Assistant of Professor of the Department of Aircraft Control Systems of the National Aerospace University – «Kharkov Aviation Institute». Chkalova st., 17, Kharkiv, Ukraine.

**ORCID ID: 0000-0003-3693-7500**